

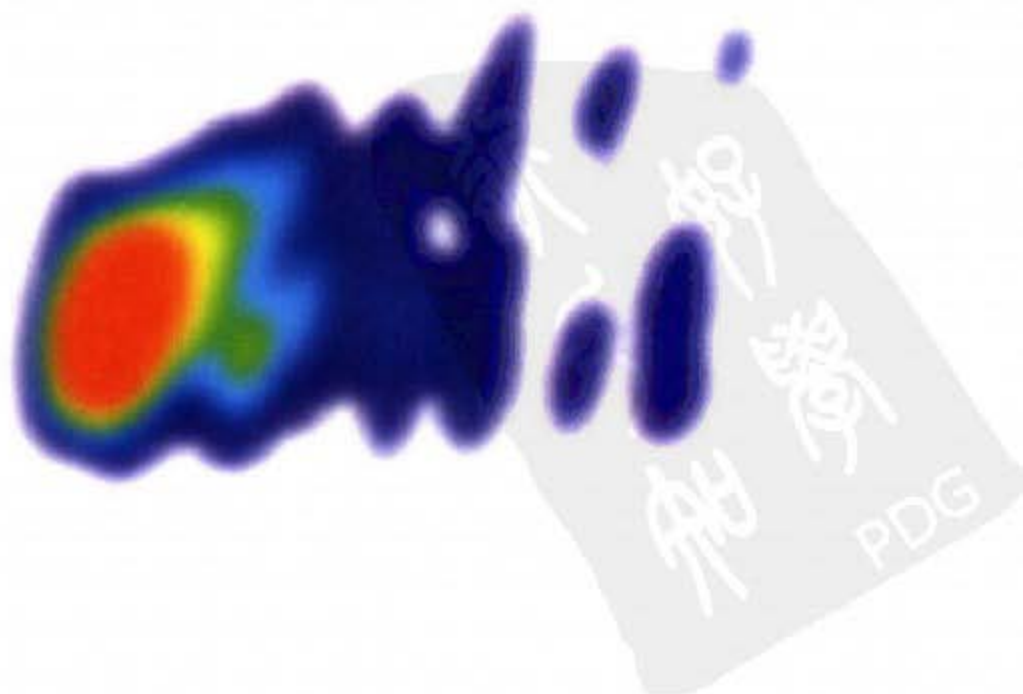
THE EDGE OF INFINITY

第一推动丛书

无限远的边缘

[美] 弗尔维奥·梅利亚 著 萧耐园 译

宇宙中的特大质量黑洞



湖南科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

无限远的边缘：宇宙中的特大质量黑洞/(美) 弗尔维奥·梅利亚著；
萧耐园译. —长沙：湖南科学技术出版社，2006.11
(第一推动丛书)

ISBN 7-5357-4713-2

I. 无... II. ①梅... ②萧...

III. 黑洞—普及读物 IV. P145.8-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 111042 号

The Edge of Infinity by Fulvio Melia

© Cambridge University Press 2003

All rights reserved including the rights of reproduction in whole or in part in any form

Simplified Chinese Edition Copyright: 2006 Hunan Science & Technology Press

湖南科学技术出版社通过英国剑桥大学出版社独家获得本书中文简体字版中国大陆地区出版发行权

本书根据剑桥大学出版社 2003 年版本译出

著作权合同登记号：18-2006-013

版权所有，侵权必究

《第一推动丛书》

无限远的边缘

——宇宙中的特大质量黑洞

著 者：[美] 弗尔维奥·梅利亚

译 者：萧耐园

责任编辑：吴 炜 戴 涛

出版发行：湖南科学技术出版社

社 址：长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系：本社直销科 0731-4375808

印 刷：湖南新华印刷集团有限责任公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址：湖南望城·湖南出版科技园

邮 编：410219

出版日期：2006 年 11 月第 1 版第 1 次

开 本：710 mm × 970 mm 1/16

印 张：12

插 页：2

字 数：169000

书 号：ISBN 7-5357-4713-2/N·148

定 价：36.00 元

(版权所有·翻印必究)



总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技

能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越



民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会



目 录

序 言

1 宇宙中最剧烈的天体

在现实世界边缘的灯塔

类星体的寄主星系

“正常”星系的活动核

1

3

10

15



2 称量特大质量天体

等离子体的吸积

解读来自下落气体的信号

银河系中心

20

23

30

35



3 黑洞的时空

不可超越的引力

看不见的维数

物质无法抗拒完全坍塌

黑洞的时空

旋转的黑洞

39

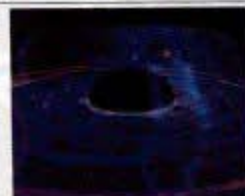
39

42

47

53

56





4 特大质量黑洞的形成

最初的种子

星系的类型

特大质量黑洞的普查

星系碰撞

仙女星系与银河系的碰撞

中等质量的黑洞

62

63

71

74

80

84

94



5 等离子体的相对论性喷射

拍摄特大质量黑洞的像

来自特大质量黑洞的喷流

比光的运动更快

97

101

106

112



6 宇宙中的特大质量黑洞

哈勃深空探测

钱德拉深空探测

宇宙辉光

未来的方向

宇宙本身是一个大黑洞吗

终极命运

121

121

123

124

127

131

138



译 注

参考文献

索 引

142

166

172



序 言

vii 大自然包含着如此奇异的成员，根据它们当前呈现的面貌，殊难追溯它们的起源。如果你想要描述它们，一定不能绕开广义相对论。它的创立几乎已有一个世纪，在物理学的发展历史中，它可能曾经是最超前的理论。它的发展如幻似梦，曾经证实了它的意义的4次验证¹——其中2次被确认为具有获得诺贝尔奖的水准——竟然没有一次揭示出这一辉煌理论的核心，其特征是对时空结构的最深奥的扰动。

宇宙会生成奇点²，致使物质义无反顾地向这点塌陷，并永远埋葬在那里，爱因斯坦曾经对这种设想犹豫不决。可是，这正是他的引力理论的最惊人的成果。

令人瞩目的是早在18世纪末期，在牛顿力学的范畴内，认为最重的恒星暗淡无光并且它的引力场能使光线弯曲的思想，已经切实提出来了。约翰·米歇尔³牧师在发表于《皇家学会哲学通报》上的一篇论文中提出，如果一颗恒星的质量足够大，它的逃逸速度将超过光速，要是光线由粒子组成，光线将落回到恒星表面，因而这类恒星是观测不到的。他用“暗星”这个词去生动地描绘这种奇特的性质（顺便说明，这个讨论看来是对宇宙中存在暗物质的首次论述）。

viii 考察这类天体如何异乎寻常，确实又经过了将近200年，这才慢慢显

示出现在被称为“黑洞”的这类天体存在的某些证据。近来，天文学家随着一系列逐步深入的惊人发现而阔步前进，许多发现是由诸如哈勃空间望远镜⁴、钱德拉X射线天文台⁵这类空间设备取得的，它们处于天体一览表中有重大变迁的这一端。

20年前，认为有大如太阳系那样的巨型黑洞的想法，似乎更像是科幻作品的素材，而与现实世界无缘。特大质量黑洞被普遍认为是宇宙中最具摧毁力的，难以纳入天文学家心目中星系、星系团这种高度有序的结构之中。但是现在我们发现这些天体贡献了渗透于星系际介质中的多达一半的辐射，其数量有2亿之多，隐藏在已知宇宙的广阔空间。

星系是怎样形成的这一问题确实还在困扰着天体物理学家，他们尽力解决为什么原始气体聚集形成如今所见的物质团块这个问题。特大质量黑洞在这一过程中的关键作用已经越来越受到关注。它们的势不可挡的引力可能触发凝聚，终于导致产生银河系这样的旋涡星系的宏伟图景。它们可能催生了恒星的爆发性形成、行星，甚至还有生命。所以特大质量黑洞可能起初曾经在这里，因为它们具有单向膜，只拉进物质，但不让任何物质外逸到我们所知的宇宙，它们都将在这里直到终结。

天文学界发现了黑洞，这一令人振奋的消息激发了公众的想像力。这是促使我写作本书的要素。我感谢杰奎琳·加吉特 (Jacqueline Garget)，在整个写作过程中她坚定地支持我，并早就领会对这一题材作品的需求。我热忱地感谢科学基金会、美国宇航局和阿尔弗雷德·P·斯隆基金会，为他们15年来慷慨地支持我在这一领域的研究。

最后，我向我生命的支柱——帕特里西亚 (Patricia)、马科斯 (Marcus)、埃利亚娜 (Eliana) 和阿德里安 (Adrian) 以及给予我宝贵引导的双亲致以诚挚的谢意。

弗尔维奥·梅利亚
亚利桑那大学，塔克逊



1 宇宙中最剧烈的天体

历史以激动人心的步伐跨越了 1963 年。国际社会兴致勃勃地欢迎一
个新成员——肯尼亚的诞生，它在这一年从大英帝国的统治下获得独立。
同时，越共军队正在开展推翻吴庭艳¹统治的斗争，并使美国深深地陷入
南亚的泥潭，导致美国与另一个超级大国——前苏联之间 10 年的紧张关
系。可笑的是也正是在这一年，美国和前苏联之间的第一个禁止核试验条
约²签订，总算是缓和日益加剧的核紧张的暧昧不定的努力。就社会的个
人而言，贝蒂·弗里丹³（Betty Friedan, 1921~2006）刚刚出版的《女性
奥秘》使促进妇女权利的争端再次浮出水面。在读者面对现代妇女抛弃她
们传统角色和想法的时候，随着抗麻疹疫苗的发现，人类在整体上已对自
然界占了上风。1963 年肯尼迪总统⁴遇刺身亡的悲剧也令人记忆犹新。

这些令人眼花缭乱的历史事件充斥着 1963 年的世界，就在这样的背
景下，两个较小的事件终于导致发现宇宙中最剧烈的天体。在帕洛玛山天
文台，马丁·施米特（Maartin Schmidt）正在深入探究恒星状天体的本质，
它的特点实在反常，同时得克萨斯大学的罗伊·克尔（Roy Kerr）在解阿
尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein, 1879~1955）的广义相对论性的场方
程时，正在做出突破性的发现。克尔的工作终于揭示了旋转黑洞周围时空
的性质，现在认为它在给极度集中的物质输送能量，正是这种物质的高度
集中于 1963 年呈现在施米特的案头，曾导致他迷惑不解。黑洞也许是宇
宙中最扑朔迷离的天体，在它包含的空间区域之内，引力极度强大，连光

线都不能逃逸——因此它被称为“黑洞”。在黑洞附近产生的光线的径迹，因强大的引力场而弯曲，以致弯向它们的内部而消失，在其他明亮介质的背景中产生黑暗的反差。

施米特书桌上的天文学谜团曾经是与剑桥第三射电源表中的第 273 号天体有关的一个恒星，这个天体的符号是 3C 273。多少世纪以来，这类天体都是默默无闻的，在夜空中只是一些微弱的光点。然而，20 世纪 40 年代射电望远镜的发展和应用，使人们逐渐认识到宇宙的某些区域正在发射出十分强烈的厘米波段的辐射。在临近 1963 年的时候，英国天文学家西里尔·哈扎德 (Cyril Hazard) 设计了一种巧妙的方法来对这类天体进行精确定位。他提出应用月掩星³，因为当月面经过射电源的时候是有可能记录射电信号消失和再现的精确时刻的。这样，天文学家就能在月掩星发生的时候，测定天空中哪一个已知的可见天体与厘米波段的辐射源相关。

哈扎德计划用设置在澳大利亚内地、离悉尼大学几百英里的帕克斯射电望远镜实施测量。但是他建议的这一观测计划几乎没能实施。那一夜他上错了火车，未能赶到观测现场。所幸的是，以约翰·波尔顿 (John Bolton) 台长为首的天文台的同事们无论如何都要继续实施这个计划。其实这是相当靠不住的行动，因为要观测的区域过于接近地平线，望远镜不能充分倾斜过来记录观测。天文台的同事们义无反顾，他们砍掉了干扰观测的树木，卸掉了望远镜的安全螺栓，使得几千吨重的设备能够充分旋转，以锁定掩星。

哈扎德的实测进行得很出色，那晚用帕克斯射电望远镜跟踪的射电
3 源——3C 273——能够被鉴定为室女座内类似单个恒星的天体。它看来像相当暗淡的天体，但是它的形态使人认识不到这一事实，即这个类似恒星的射电源（因此有了“类星体”这个名称）是一个庞大的辐射源。它的可见光的特点——基本上是光谱的颜色——是以前从来没有看到过的。施米特认识到呈现在他面前的彩色图像其实是由氢原子产生的，只是相对于在实验室里产生的波长，它的波长移动了 16%（马丁·施米特将 1 页的论文发表在 1963 年的《自然》杂志，报告了这个发现），终于解开了这个谜团。但是，这是否就只是说明在太空的物理机制比我们在地球上所见的很



不相同呢？

在现实世界边缘的灯塔

答案原来就是 3C 273 正在远离我们。正如我们所听到的火车汽笛声取决于火车以多快的速度离开或者驶近，光线波长的位移是光源移动速度的指示器。光线的红移——即光线的波长增加——越大，光源的退行速度越快（类似地，“蓝移”即指光源正在接近我们）。⁶ 在施米特和他的同事们看来，波长的位移是十分显著的，因为从埃德温·哈勃⁷（Edwin Hubble, 1889~1953，哈勃空间望远镜就是以这位伟大的天文学家命名的）所在的时代起已经知道，宇宙距离直接正比于速度⁸。根据施米特对 3C 273 测定的红移，它一定比原先人们所想象的要远得多。

为了理解这一解释的起源，我们必须把日历往回翻过 40 年，回到“宇宙”的观念还没有完全孕育的时期。在 20 世纪 20 年代之前，哈勃的大部分同事认为银河系，即南半球的夜空中旋涡状密集的恒星，基本上就构成了整个宇宙。银河系带着我们的太阳以每秒 250 千米的速度运动，约 2.2 亿年环绕它的中心旋转一周，因此它看上去相当大，大到足以满足我们 4 认为宇宙相对于人世万物无比巨大的根深蒂固的观念。但是哈勃在南加利福尼亚威尔逊山寒冷的山顶观测宇宙深处，确认银河系只不过是许多星系中的一个，从而向无比广大的宇宙深处发起了挑战。

在 20 世纪 20 年代末，当全世界正处于经济危机的悬崖边的时候，哈勃以另一个更令人瞩目的发现让科学界震惊：他宣称由星系点缀的宇宙正在膨胀⁹。星系这类发亮的标记，恰如正在膨胀着的气球上的斑点，正在彼此分离，分离的速度随距离而增加。阿尔伯特·爱因斯坦（图 1-1）早先曾经假设宇宙是静态的和永恒的，这一发现使他也感到吃惊，并在 1929 年无奈地承认并撤销他所宣称的“一生中所犯的最大错误”。现在哈勃的理论被看做是宇宙起源的大爆炸理论的第一个证据，根据这个理论，我们的这个宇宙不仅有时间上的起源，而且显然是从一个点上开始不可逆转地膨胀，起初所有的物质都压缩在这个点上。这一发现让哈勃在世界上

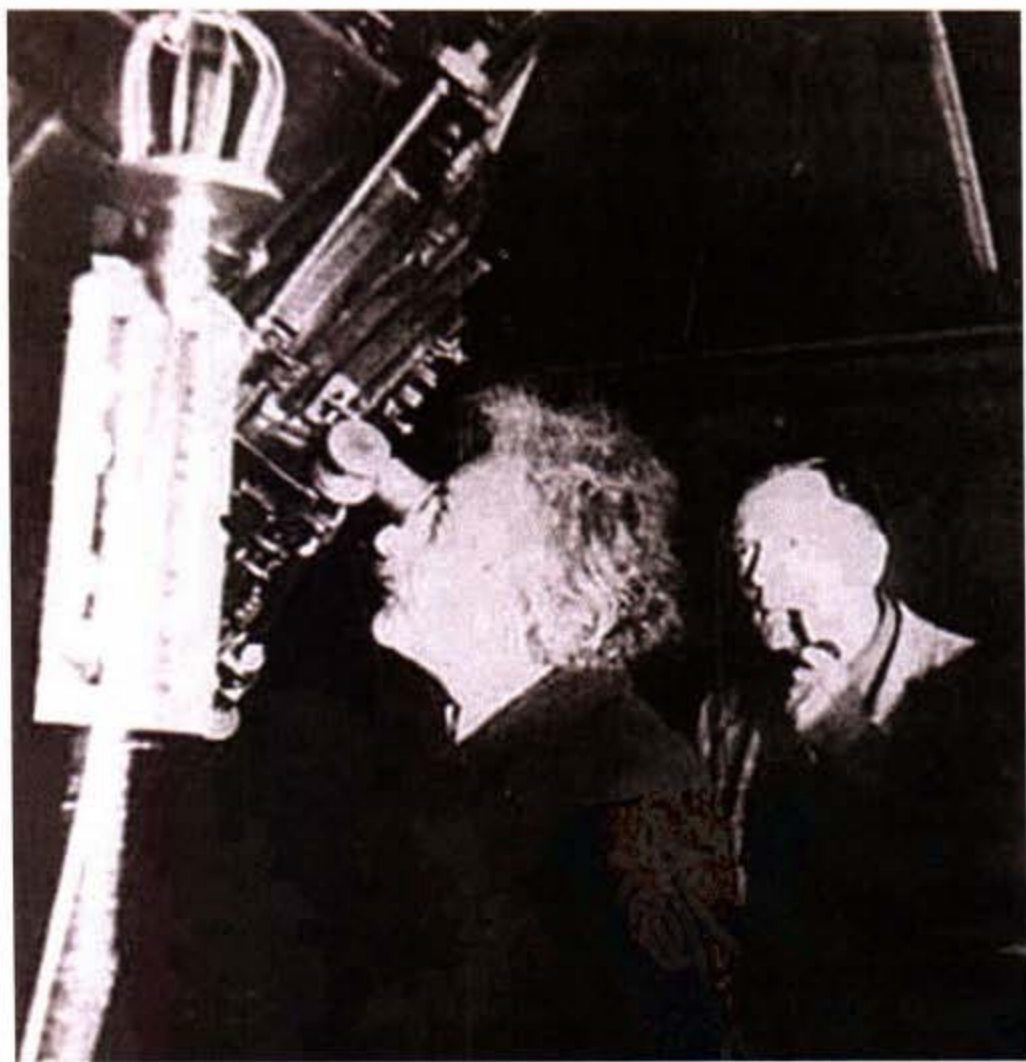


图 1-1 1930 年 1 月，阿尔伯特·爱因斯坦在威尔逊山访问了埃德温·哈勃，后者正是在那里发现了宇宙膨胀。在这张照片上，哈勃（右方）注视着正通过 100 英寸（约 254 厘米）望远镜的牛顿焦点观测星空的爱因斯坦（左方）（摘自埃德温·哈勃论文集。感谢加利福尼亚州圣马力诺市亨丁顿图书馆允准复制）



赢得了极高的声誉，在 20 世纪 30~40 年代成为好莱坞深受欢迎的客人，他在那里与一些明星，如查理·卓别林 (Charlie Chaplin)¹⁰、海伦·海斯 (Helen Hayes)¹¹ 和威廉·兰多尔夫·赫斯特 (William Randolph Hearst)¹² 等成了朋友。

那时人们已经知道来自某些外观奇特的星云（在那个时代，它们还没有与星系联系起来，而被认为只不过是发光的气体球）的光线比它们本来应有的状态显得更红。对于这种所谓的红移，远离我们的运动看来是最可能的原因。哈勃在仔细研究之后，确定了退行星云的距离，从而发现了被称为哈勃定律的规律：星系离地球越远，它看起来移动越快。

由于哈勃关于宇宙和宇宙学领域里的发现和创见，他理所当然地获得了许多奖励，但是直到他逝世都缺失的一个奖项是诺贝尔奖。然而，这并非由于他不努力，因为在 20 世纪 40 年代晚期，他甚至雇用了一名代理人宣传他的辉煌的工作。就在那个时候，诺贝尔奖委员会把天文学领域（他本来应该在这一领域获奖）添列到物理学的相关学科中去。可惜已经太晚了，哈勃于 1953 年逝世。不过他的英名永存，镌刻在哈勃空间望远镜的镜筒上，这台望远镜正在成功地实现着由他在南加利福尼亚寒冷的山顶上开创的事业。

所以在哈勃做出惊人发现的 30 年之后，施米特毫无困难地说服了他的同事们，使他们相信这 16% 的红移要归因于来自 3C 273 的光线蕴含了几乎每秒 3 万英里（约 4.8 万千米）的退行速度，因此它与地球的距离为 30 亿光年（1 光年是光线在 1 年里走过的距离。作为比较，光从太阳到达地球仅需 8 分钟）。天文学家由此得出结论；3C 273 的类似于恒星的像清晰地显示了它的真实的本质；它一定属于宇宙内最强有力的辐射源之列，以致在这么大的宇宙膨胀过程中显得如此活跃。

钱德拉 X 射线天文台拍摄了这一具有历史意义的天体的新近的像（参看图 1-2）。这个当代最高水平的探测器原先称为高级 X 射线天体物理卫星，于 1999 年由航天飞机携带升空，后来被重新命名为钱德拉 X 射线天文台，以纪念已故印裔美籍诺贝尔奖获得者苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar)¹³。钱德拉这个词在梵语中的意思是“月

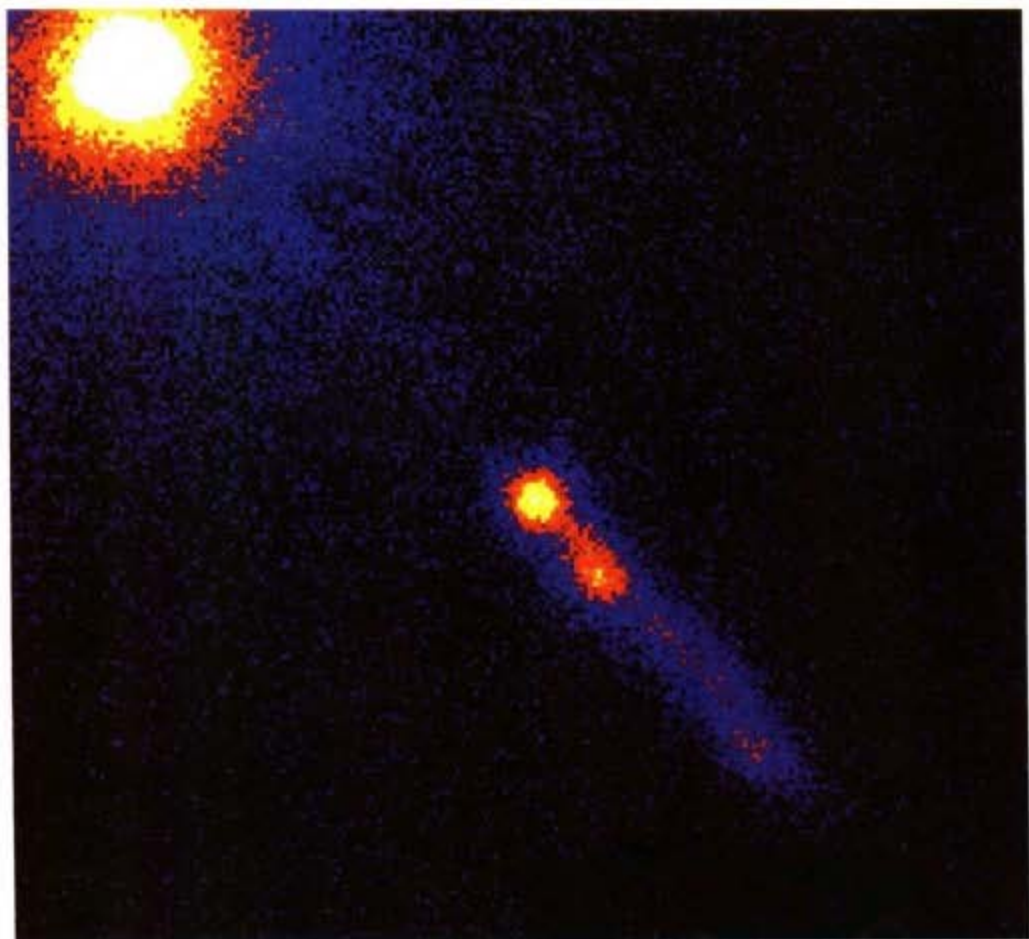


图 1-2 发现于 20 世纪 60 年代初期的类星体 3C 273（左上角明亮的天体）是第一批被证实为“类星射电源”（类星体）的天体之一，虽然带有令人十分疑惑的性质，但它显示出令人难以置信的光学和射电亮度。天文学家通过深入分析得到深刻的结论，即 3C 273 和其他同类天体完全不是恒星，而是远在几十亿光年之外的令人难以置信的剧烈的天体。这张像由美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台用它无与伦比的高分辨率拍摄。它的大小是 22×22 角秒，在 3C 273 的距离上大致相应于 2000×2000 光年。^[1] 类星体常常从它们的核心发射高能量的喷流，速度非常接近光速。这里，钱德拉 X 射线天文台卫星首次展示了由 3C 273 的喷流产生的 X 射线的稳定辉光，它的每一个亮结点比许多其他类似天体的全部高能输出还要亮（承蒙 H. L. Marshall 等、美国宇航局和麻省理工学院惠赐照片）



亮”或“明亮的”，十分符合这次使命的含义，映衬了钱德拉塞卡不倦地追求知识和真谛。本书的许多内容在于展开黑洞理论和钱德拉 X 射线天文台正在研究的其他现象。作为 20 世纪最优秀的天体物理学家之一，钱德拉塞卡受到了广泛关注，他研究了支配恒星结构和演化的物理过程的理论，为此而荣获 1983 年诺贝尔奖。钱德拉 X 射线天文台分辨细节的能力提高了 50 倍，在 X 射线天文学的领域引入了一场革命，并以它超过 15 米的长度和大于 50 吨的质量，成为航天飞机送入地球轨道的前所未有的最大人造天体之一。

然而，类星体的故事并不到此为止，天文学家们把 3C 273 冠以宇宙中最剧烈的天体，还致力于揭示它的惊人的特点。他们立刻认识到 3C 273 及其同类天体的全部光能输出的变化只发生在 10~20 个月的期间内，这意味着产生可见光的区域不会超过几光年——基本上只是太阳与它最邻近的恒星之间的距离。设想有一群人正在翘首企盼一位著名演员在广场的某个角落露面，突然这群人的一边有人先睹芳容，并迅速地把消息传给旁人。人群中的每一个人都得到通报并转脸望向演员所需的时间，即其间经过的秒数，取决于消息在一人接着一人之间传递的快慢。人群越大，每个人都把目光投向演员所需的时间就越长。在 3C 273 内，可感知的最快信号以光速传播，所以这个最剧烈的辐射源不可能大于光在观测到的 10~20 个月之内经过的距离。由此天文学家推断，即使与太阳的邻近空间相比，这个宇宙中最剧烈的天体也是相当的小，更不能与银河系这么大的结构相比，后者延伸的距离要大过 10 万倍。

诸如钱德拉 X 射线天文台之类的 X 射线探测器的探测结果进一步验证了这些结论，表明类星体的 X 射线辐射比可见光更明亮。这些 X 射线的变化周期只有几小时，说明辐射源的大小要小于海王星轨道。事实上，类星体是迄今发现的最剧烈的 X 射线辐射源，其中有一些相当明亮，以致在 120 亿光年之遥也能看到。每个类星体释放的典型能量远大于整个星系发出的能量，可是驱动这么剧烈活动的中央发动机只占据了小如太阳系的空间！

现在，在根据类星体的可见光首次证实这类扑朔迷离天体之后的 40

年，天文学家们又发现了一种类星体，它们的大部分辐射极其微弱，除非它们刚好是宇宙中最剧烈的 γ 射线源，否则无论如何也探测不到。 γ 射线是能量最大的光子——光子是单份能量，它们集合在一起形成光束——如今我们已能用太空仪器探测它们。它们非常难以大量产生，只有极少数天体能以足够的强度辐射足以让我们察知它们存在的 γ 射线。近来，一个国际科学团队应用美国宇航局于1991年发射的康普顿 γ 射线天文台获得的资料，发现了一个类星体，它以这种类型的辐射照耀着宇宙深处的天空，距离在100亿~110亿光年，不过在可见光波段它几乎黯淡无光[参看Malizia *et al.* (2001)，关于这一非常有趣发现的技术报告]。研究人员对这个类星体所在的大熊座天区连续扫描，他们把所获得的光学像结合起来，取得了这一巨大成果。

这一奇幻的思想——即这么小的体积竟然能在宇宙中撒布相当于1000亿个太阳发出的光线——导致物理学家们设想类星体一定是特大质量黑洞以辐射现身。在下面的两章中，我们将看到完美的探测工作，它们提供了关于类星体的质量和无与伦比的强大能量的信息[参看例如Salpeter (1964)，Zel'dovich 和 Novikov (1967) 以及 Lynden-Bell (1969)]。

很自然地会提出这样的问题：这类天体是“裸露的”——又深又黑的、漫无目标地浮游在原始的宇宙汤里的物质陷阱，还是归属于宇宙早期较能辨认的结构？就在使用机械方法和电子方法消除类星体中央发出的非恒星的强光之后，天文学家得到了这个问题的答案。在某些情况下，天文学家看到一个模糊的光斑包围着明亮的灯塔，在仔细地考察了这片光芒之后，发现它具有颜色和一个正常巨星系的其他特点。

近些年来，证认源的任务用哈勃空间望远镜更容易完成（例如参看图1-3）。事实上，揭示与类星体的性质有关的秘密正是制造和发射这个大型空基设备的主要目的。许多年之后，哈勃空间望远镜终于能提供天文学家所需要的线索，以了解这些强大的灯塔在何处而且为什么形成。当前最广泛采纳的观点是类星体存在于其中心有活动的、特大质量黑洞的星系里。由于它们离地球极其遥远，寄主星系看上去非常小而暗，而且在它们中心的远为明亮的类星体光芒的映照下，更难以看清。



图 1-3 这张哈勃空间望远镜拍摄的像显示了微弱的寄主星系，名为 QSO 1229+204 的明亮的类星体占据其中。这幅图像的细节有助于解开 30 年来关于类星体这类宇宙中最遥远和剧烈天体的真实本质。类星体看起来处于外形普通的星系的中心，这个星系有两条恒星的旋臂，连接着一个棒状结构。这张像显示了一对比较接近的类星体中的一个，在哈勃空间望远镜后来新装了宽视场和行星照相机之后，这个类星体对曾被选为检测分辨率和机械性能的早期目标，这个照相机装有特殊的光学器件，可以修正哈勃空间望远镜主镜的缺陷（承蒙 J. Hutchings、多米尼翁天体物理台以及美国宇航局惠赐照片）

类星体的寄主星系

新的地基望远镜具有足以看到宇宙边缘的集光能力，天文学家通过应用哈勃空间望远镜和近来应用新的地基望远镜所进行的观测，已经确定类星体处于各种不同类型的星系的核心——从规则星系到因碰撞或并合受高度扰动的星系。然而，在各种情况下，一定要提供燃料以让这些唯一明亮的灯塔发光。在本书的稍后部分，我们将看到当在这么遥远的星系核里的特大质量黑洞开始从其周围吸积恒星和气体时，类星体便脱颖而出；物质转变为能量的转化率可能大到每年 10 个太阳。强烈的辐射场在等离子体向视界冲刺的最后阶段发射出去——视界是一道门槛，越过它之后任何物质再不能返回我们的世界。所以类星体的特性和功率必然取决于有多少物质供它消耗。

现在大多数天文学家都认为，与邻近星系的引力相互作用引发的扰动促使物质向类星体的寄主星系的中心掉落。诸如设置在智利帕拉那尔的甚大望远镜¹⁵之类的大型仪器能够探测远达 100 亿光年处的类星体的周围环境，图 1-4 显示了其中一个实例。在这个实例中，类星体（图 1-4 中心明亮的点状天体）看来着床于由若干结点和弧段组成的复杂的结构之中。尤其是在类星体像正下方的天体与类星体的投影距离只有 2 万光年，大约是地球与银河系中心距离的 2/3。这个天体非常像是与类星体的寄主星系起相互作用的伴星系。然而，这张图像的最使人迷惑的部分显然是从类星体本身延伸出去的尾巴。众所周知，这类尾巴产生于与相邻星系的碰撞，这时相关结构的引力场都把对方的边缘撕裂开来，产生了拉伸出的弧形残骸。图 1-5 是这类壮观的交会的一个实例，是哈勃空间望远镜在南天乌鸦座里成功拍摄到的。

然而，许多类星体存在于显然未受扰动的星系之内，而这可能表明不同于大团物质剧烈碰撞的机制也能够为处于星系核心的特大质量黑洞有效地提供能量。在看到哈勃空间望远镜拍摄的星像之前，天文学家已经达成共识，认为除非碰撞正在向黑洞释放大量的气体，否则蕴含着这类宇宙饕

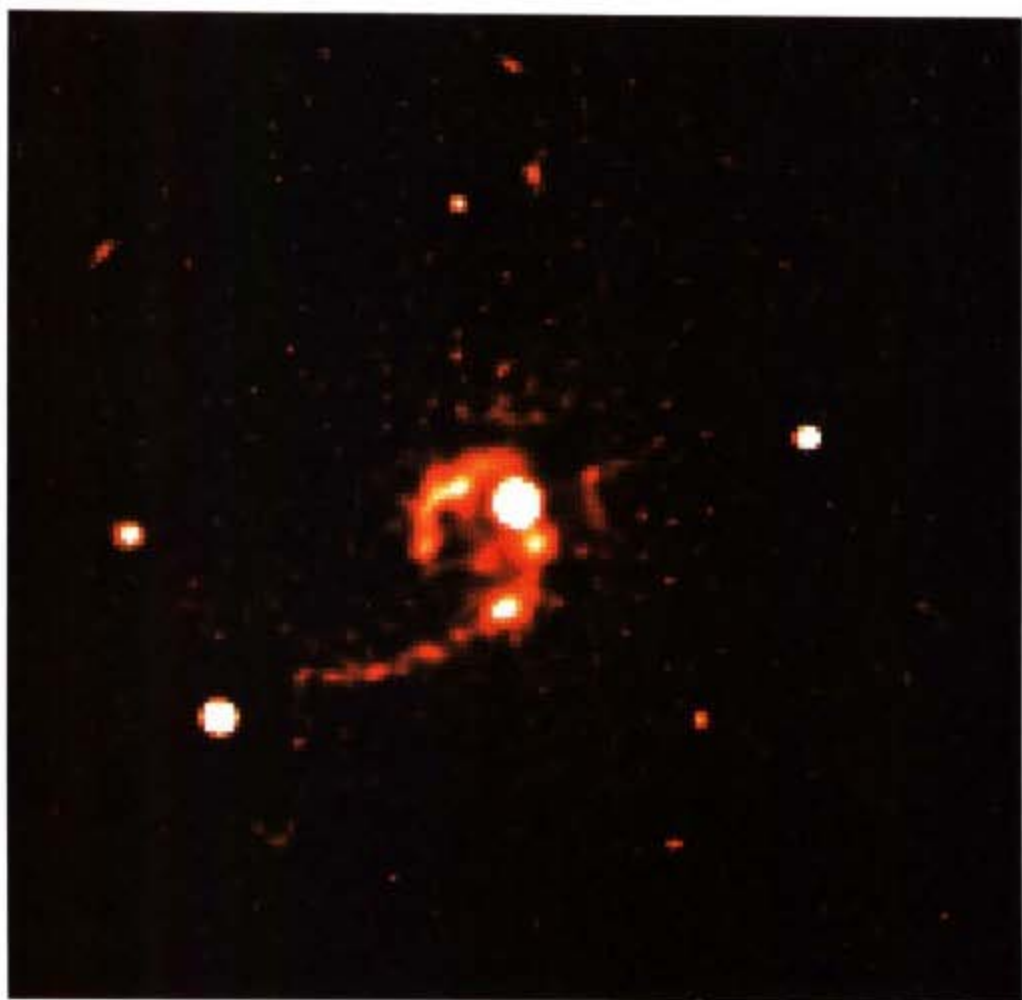


图 1-4 这张壮观的像展示了远距类星体 HE 1013-2136 及其邻近和复杂的环境，它是用设置于智利帕拉那尔的甚大望远镜拍摄的。这个天体见于南天水蛇座，距离地球约 100 亿光年。类星体是这张像中心的点状天体。它位于一个复杂的结构之内，这个结构包含两个弧形的有结点的尾巴，延伸到 15 万光年之外，这是银河系直径的 1 倍半。人们认为两个尾巴是类星体的寄主星系与一个或更多个密近的伴星系剧烈碰撞的结果。这类交会的一个例子发生在离我们仅仅 6300 万光年处，如图 1-5 所示（承蒙 Klaus Jäger 等和欧洲南方天文台惠赐照片）



图 1-5 左图是触须星系（以前称为 NGC 4038/4039）的地基图像，它位于南天乌鸦座，离地球约 6300 万光年。这对长长的、明亮的尾巴因两个星系之间的引潮力而形成。哈勃空间望远镜足以拍摄清楚交会处的内部核心区域，展示这次壮丽的“焰火表演”（右图）。有 1000 多个明亮而年轻的星团参与了这次表演，它们活力迸发，位于由明亮的蓝色恒星点缀的旋涡纹中，这种图像是迎头碰撞的结果。此孪生星系的分离双核是橙色斑点，在右图中心的左右两边，交织着黑暗的尘埃纤维。一条宽的尘埃带在两个星系核心之间的复合区域延伸。人们认为类似于这样的碰撞形成了如图 1-4 所显示的尾巴（承蒙 Brad Whitmore、空间望远镜科学研究所和美国宇航局惠赐照片）

贫的星系不足以及时给它们提供燃料，以维持充分发育的类星体。换句话说，即使所有类星体是特大质量黑洞，也并不是所有特大质量黑洞都可看做类星体。反之，天文学家认为，这些不剧烈的巨型天体充其量只能成为比较暗弱的星系核，它们正是我们在银河系邻近主要观测到的。（一个具有其活动弱于类星体的特大质量黑洞的星系称为活动星系，而其中心的大质量核称为活动星系核。我们的银河系和我们的近邻仙女星系是正常星系



的两个例子，它们的特大质量黑洞几乎没有等离子体可资吸收。此外，如我们将在第4章所介绍的，某些星系显然没有特大质量黑洞。）关于一个未受扰动的星系如何催生类星体的问题还没有得到充分的解答。可能正在研制的、预期在2010年升空的下一代空间望远镜，将能比哈勃空间望远镜探测得更加深远，并为解决这个谜团提供进一步的线索。

现在已经发现了15000个以上遥远的类星体，在20世纪60年代，它们曾被误认为近距离的异常恒星。随之我们可能会疑惑，为什么类星体会集中于可观测宇宙的边缘，而在我们的近旁尽付阙如，我们在近旁所能见到的只不过是暗淡的（虽然有时是活跃的）星系核。 12

当宇宙年龄还只是现在的十分之几，大约在大爆炸之后10亿年，那些最遥远的类星体由于其固有的光度，已经可见。由芝加哥大学和美国国立费米高能加速器实验室合作的斯隆数字巡天计划发现了一个编号为SDSS 1044-0125的天体，并记录了它的距离。设置在夏威夷的凯克望远镜具有无可比拟的集光能力，随后，天文学家应用凯克望远镜¹⁶对这个天体继续进行观测，看到了它的彩色的光谱并测定了它的红移，在加利福尼亚大学伯克利分校，由马克·戴维斯（Marc Davis）领导的一个小组确认这的确是一个类星体。他们惊讶地认识到这是迄今为止宇宙中发现的最远的天体，这个灯塔一定属于第一批形成的天体之列。我们接收到的来自它的光线是在宇宙年龄只及当前1/10时发射的，已非常接近于我们所能观测的极限。这个类星体实在太远，以致宇宙膨胀使它的光线位移量很大，把原来发射的紫外光子经过光谱的可见光部分而位移到了红外区域。

有时天文学家把望远镜称为“时间机器”，因为光线以有限速度传播，所以被看到的遥远天体存在于它发射光线之际的过去。当我们看着太阳的时候，我们看到的是它8分钟之前的形象——这是它的辐射到达我们这里所需的时间。让我们把目光从太阳向远方延伸，看到较近的恒星，这是它们几年前的模样，而当我们对银河系的邻近星系，例如仙女星系的雄姿赞叹不已之际，我们已沿时间回溯了几百万年。当我们凝视着第一批类星体闪耀的宇宙边缘时，我们看到的是100亿年前发生的活动。

若我们试图了解为什么这类剧烈的天体并不存在于我们的邻近空间， 13

我们就不能忽视这个线索，即类星体的距离与其蕴含的回溯时间之间的联系。斯隆数字巡天计划显示大量类星体在大爆炸后的 10 亿年间迅速产生，在 25 亿年后到达顶峰，随后又急剧地下降，直到今天。（当这项工作完成之际，斯隆数字巡天计划最终将巡视 1/4 个天空的 2 亿个天体。其中 100 万个是类星体，它们将为统计和演化的研究提供大量资料。）

似乎有新鲜物质抛向类星体的邻近空间时，它们会被激活（请参阅图 1-4），然后不久就暗淡到几乎难以察觉。在这类燃料耗尽之前，它们狼吞虎咽地吸取，所以类星体和其他类型的活动星系核表现出相同的现象：一个特大质量的黑洞以接近光速的快节奏吞噬着热气体，这里并不涉及在银河系中心和仙女星系核心处的比较温和的巨型天体。我们看到的究竟是一个类星体还是一个活动星系核，可能更多地取决于有多少气体出现在它的周围而不是其他情况。

然而，并不是我们周围所有的特大质量黑洞都必然通过类星体阶段而形成。下面我们将马上看到，类星体是由质量达 10 亿个太阳的物质压缩于一身而形成的天体，可是在银河系中心的黑洞只不过含有区区 260 万个太阳质量而已。近邻仙女星系中的黑洞稍微重些，也不超过 1000 万个太阳。换句话说，看来我们不能下结论说我们邻近的特大质量黑洞一定是它们生命初期的休眠的类星体。确实，我们现在已有某些证据表明银河系和仙女星系正在暗暗发力，通过驻留在核心的形成中的物质团块，有朝一日产生自己的类星体（请参阅第 4 章）。

近来相当重要的一项发现增加了上述论断的可信度。18 世纪末，法国天文学家沙尔勒·梅西耶¹⁷ (Charles Messier, 1730~1817) 编制了星云和星团表¹⁸，M82 星系被收入表中，编号为第 82，因此获得这个名字。现在，220 年之后，美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台正在瞄准这个天体，看来有一个中等大小的黑洞位于距其中心 600 光年处 [若想进一步了解这一发现，请参阅 Matsumoto *et al.* (2001)]。这个天体在一个不大于月球的区域内拥有着 500 个太阳的质量。不难想象这个天体最终会沉没于 M82 的中心，它将在那里长大并最终名正言顺地成为一个特大质量黑洞，而不必经过疯狂吞食的阶段，而那恰是类星体现象。



这些中等质量的黑洞，比诸如天鹅 X-1（它因沃尔特·迪士尼的电影《黑洞》而名声大噪）之类的恒星大小的黑洞重 1000 倍，已开始被定义为一种类型。可是它们还是比最大的一类黑洞，如在 3C 273 核心的那个巨无霸，小 1000~100 万倍。然而，它们的表现类似于小型的、位于最明亮星系核内的特大质量天体，并且通过吸收邻近的物质而持续长大。这种新型的天体告诉我们，并非所有邻近的特大质量黑洞已经开始类星体阶段的灾难性生涯，其中一些已经成为某些星系基质中的恶性肿瘤。

“正常”星系的活动核

类星体以它们暴烈的高能，令人炫目地展现在可观测宇宙的实实在在的边缘，它们高居于我们所知的各类天体的巅峰，威风凛凛地调动着我们的注意。从小的距离尺度来看——在几十万光年之内，而不是在因膨胀而分离至 200 亿光年（原文为 280 亿光年，不知所据——译者注）的宇宙边缘——在我们的邻近空间充满了巨型黑洞，它们的质量可能与它们的类星体兄弟类似，但是它们的节食习性却与我们现在所认识的那些远距离天体的活动不同，因而完全排除在后者之外。看来大自然正在向敢于探测特大质量黑洞秘密的人闹一个恶作剧，尽管类星体很剧烈，但是它们太远，不可能去精确地研究（例如参看图 1-2），而在近旁，在仙女星系核心和银河系的中心，巨型天体馈赠甚少，因而几乎观测不到。

然而，我们将在第 6 章看到，根据哈勃空间望远镜和钱德拉 X 射线望远镜的最新探测结果，有多至 2 亿个的黑洞可能隐匿在广袤的太空。这些天体藏身于活动星系的核内，在极远和邻近两个极端距离之间占据着十分有利的位置。最有名的例子是半人马座 A，作为这一族群里出类拔萃的样板，它是上天的恩赐，位于南天半人马座里，距离不过 1100 万光年（图 1-6）。哈勃空间望远镜透过向这个星系中间延伸的黑暗尘带，发现了一个盘，它由发光的高速气体构成，环绕质量约 2 亿个太阳的密集物质旋转。这一成果是通过国际科研协作取得的，科学家们首先使用帕拉那尔天文台的甚大望远镜 [这项观测是由意大利、英国和美国的天文学家小组开展

15



图 1-6 南天的半人马星座包含离地球最近的活动星系。它是这一天区最明亮的射电源，距离只有 1100 万光年。这张像是 3 幅照片的合成像，由设置在智利奎延（Kueyen）的欧洲南方天文台用蓝色、绿色和红色滤光片拍摄。深度黑暗的带被认为是较小的漩涡星系的遗迹，它与一个大的椭圆星系碰撞，并最终被并合，而不像图 1-5 中正在进行的相互作用使星系形成恒星集结的旋涡纹。如果我们用射电望远镜去拍摄这个使人难忘的美丽星系，就能看到两个极其壮观的等离子体喷流从中心区域向垂直于黑暗尘带的方向喷涌而出（参看图 5-7 和图 5-8）。这种相对论性的等离子体喷发是与图 1-2 中的明亮 X 射线流一起产生的，还有辐射射电波的粒子束，我们将在图 1-8 看到（承蒙 Richard M. West 和欧洲南方天文台惠赐照片）



的，包括 E. Schreier (空间望远镜科学研究所)、Alessandro Marconi (阿尔切特里天文台)、Alessandro Capetti (都灵天文台)、David Axon (赫特佛德郡大学)、A. Koekemoer (空间望远镜科学研究所) 和 Duccio Macchetto (空间望远镜科学研究所)]，然后使用哈勃空间望远镜的红外探测器 (请参看图 1-7)，终于在如图 1-2 所示的 3C 273 的令人怀念的图像里找到了罪魁祸首。从事这项研究的科学家很快认识到，位于中心的这个巨大质量不能归于正常恒星，因为即使这些天体在这里的红外像中显得相当

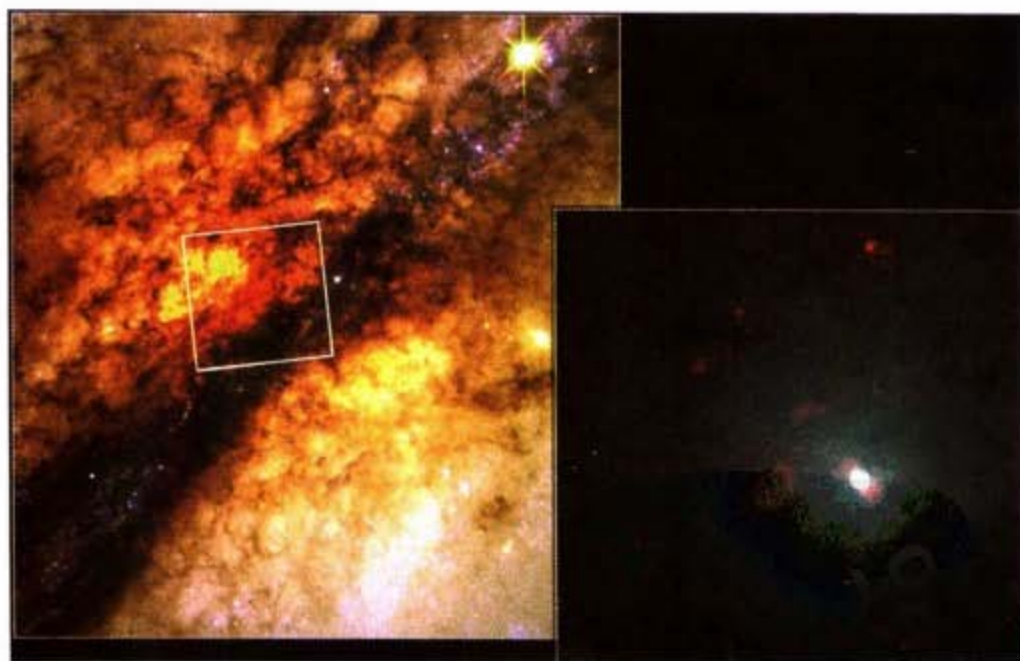


图 1-7 哈勃空间望远镜近红外照相机多光谱仪 (NICMOS) 对向半人马座 A 稠密的尘带中心，轻易地发现了一个炽热气体的倾斜盘，图中看到的是越过像的中心沿对角线方向的 (暗淡的) 白色斜杠，长度超过 130 光年。这里集中的质量，要求把高速气体聚拢在这个结构的中心，据推断达 2 亿个太阳。盘附近的红色斑块是发光的气体云，它们正在受到来自活动核的强烈光线的辐照。右下角的像是左边像中央的方框区域的放大，它是图 1-6 中心区域的放大像，是由哈勃空间望远镜装备的宽视场和行星照相机-2 (WFPC2) 拍摄的 (承蒙空间望远镜科学研究所的 E. J. Schreier 和美国宇航局惠赐照片)

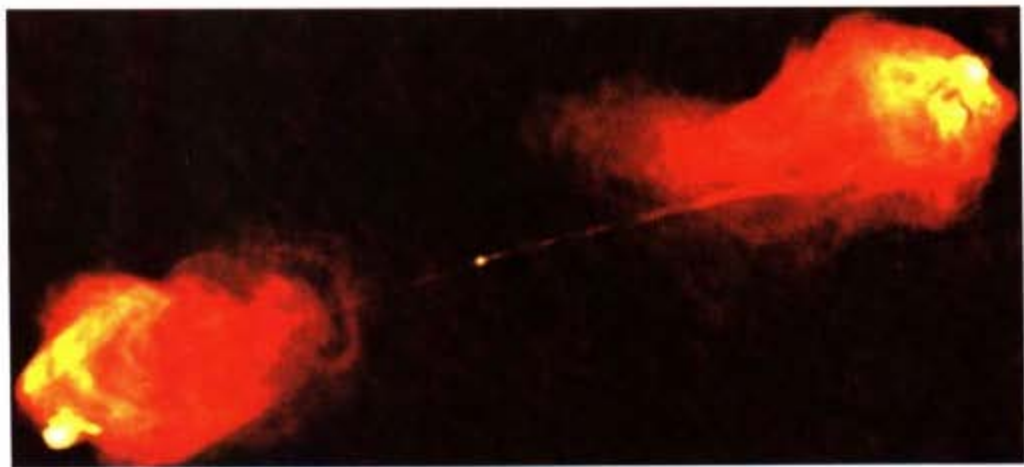


图 1-8 设置于新墨西哥州索科罗的甚大阵 (VLA) 拍摄了宇宙中许多特殊天体的壮丽图像，但是没有一张比这张更具魅力，图中我们看到位于天鹅座的名为天鹅座 A 的星系核中强烈的发动机及其相对论性的等离子体喷射。这个辉煌的全景是在 6 厘米的射电波段拍摄的，它展示了在空间延展 50 万光年（大于整个银河系尺度的 3 倍）的高度有序的结构，它们之间的致密射电核发出的高能粒子束的极细喷流馈饲它们。当这两股喷流冲涌进存在于星系际的稀薄气体中时，形成了巨大的双瓣。尽管天鹅座 A 与我们的距离十分遥远（超过 6 亿光年），它还是天空中最近的剧烈的射电星系和最明亮的射电源之一。喷流保持这种稳定的形态已超过 50 万年（可能将长达 1000 万年），这一事实表明有一个高度稳定的中心天体——可能是一个高速自转的特大质量黑洞，像一个固定的陀螺仪那样运行——必定是所有这些活动的根源 [承蒙 Chris Carilli, Rick Perley, 美国国立射电天文台 (NRAO) 和大学联合公司 (AUI) 惠赐照片]

平淡，它们却在明亮地发光，产生强烈的光芒射向中央。

说半人马座 A 是一个典型的活动星系核，还有另一个十分重要的理由：它明显地正在把高能粒子汇成垂直于黑暗尘带的粒子束。因此，它很可能兼具 3C 273（参看图 1-2）中的产生 X 射线喷流的黑洞和另一个著名的活动星系核天鹅座 A（如图 1-8 所示）的特征。

- 16 普遍认为，当下落的气体被压缩并加热到温度超过 10 亿度时，就会产生类星体和活动星系核发出的强烈辐射场（参看第 2 章）。类星体和活动星系核猛烈地吞噬物质，有时不可避免地造成物质的外溢；射电和 X 射



线的观测显示等离子体喷流常常从半人马座 A 和天鹅座 A 的核心以接近光的速度喷射而出。正如我们将在第 5 章所见，它们形成了紧紧束缚在一起的粒子流，从星系冲决出来，在星系际空间穿越成百上千光年。

在下一章我们将开始追踪天文学家收集的关于宇宙中最剧烈的天体的诱人线索和它们叙述的动听故事。特大质量黑洞的发现——不论它们是在我们星系近旁的沉睡中的巨兽，还是潜藏在远方星系核心的黯黑实体，甚至是在可见宇宙边缘的强大灯塔——使我们更加迷茫，并使我们对时空的性质以及星系的起源和演化这些基本问题感到困惑。这类天体是怎么形成的？人们怎样去“称量”它们？它们真是宇宙中深藏不露的孤岛而我们难见其真容？当天体物理学家在处理这类科学疑问的时候，常常会提出更多他们难以回答的问题。正因如此，我们将深入揭示这些时空结构中的无底洞在关系我们的起源和终极命运时所起的作用。



2 称量特大质量天体

- 17 特大质量黑洞无疑是宇宙中最剧烈的天体，甚至这一属性还不足以适当地反映它们向周围作用的猛烈程度。是的，它们的引力是毫不留情的，但是更有甚者——我们现在只能这么说——一旦物质接近它，即使以接近光的速度运动，也将毋庸置疑地不能逃脱。产生这一效应的半径称为黑洞的视界¹，因为在视界之内没有任何事物能与外部世界交流，所以我们无法直接看到这样一个天体。反之，它的存在有可能根据它在明亮背景，例如一个致密的星团前投射的影子而推断出来。然而，为了得到实施这种观测的一丝希望，我们必须与高度集中的质量相当接近，以便在无数个其他细节间，例如从其周围环境中，能实实在在地分辨出亮度的下降。

我们最初认识特大质量黑洞，是因为它发出的无可比拟的巨大能量。例如，图 1-2 中 3C 273 的像证实了它作为可观测宇宙中最明亮灯塔的性质。不过，它本来应该是黑的，拖拽万物落入灾难性的深渊，绝不释放任何东西——粒子或光线——以便隐藏它的秘密。

原来，特大质量黑洞之所以发亮，是因为向它们掉落的物质在进入它们的视界永久消失之前，受到压缩和吸引，产生了辐射。它们通过间接方式发光，拖拽着不走运的物质陷入绝望的陷阱，照亮宇宙初期笼罩一切的黑暗。天体物理学家在研究黑洞时，做得更多的是了解物质在掉入万劫不复的深渊时发生的事情。

- 18 最近诺丁汉和伯明翰的一些天文学家做了一件很巧妙的探测工作，以



引人入胜的证据表明在 120 亿年前，特大质量黑洞刚刚存在之初，它们便开始无情地吸收质量。为了展示这一效应，这些天文学家必须克服一个困难：黑洞（和它们的寄主星系）所经历的时间远远地长于人类测量它们的时间尺度。这样一来，它的获取质量的速率对于寿命只及宇宙年龄亿分之一的人类来说，是不可察觉的。

然而，人们不是去追踪单个黑洞在时间进程中的改变，而是比较已知的不同年龄的黑洞的特点。假定某一类型天体中的每个成员的生命历程经过了或多或少相同的阶段，那么两个不同年龄天体之间的质量差相当于较大年龄成员在相应时间里获取的质量。

诺丁汉和伯明翰的天文学家 [参看 Merrifield, Forbes, and Terlevich (2000)] 采用了这一方法，此外还假定在寄主星系里黑洞的年龄与星系的年龄成正比。星系的年龄增大是因为星系里的恒星在消耗燃料。随着灰烬在星系内部散布，恒星改变着颜色，所以天文学家能够通过观测星光推断星系的年龄。按这种方法，天文学家编制了 23 个近距星系及其特大质量黑洞的表，包括诸如仙女星系这种著名的天体。

这个表内各成员的年龄跨度为 40 亿~120 亿年，通过考察它们呈现的变化趋势，天文学家发现在年轻星系里的黑洞的质量是相当一般的，而在较老星系里它们的同类则随年龄增大而逐渐变重。这样看来，特大质量黑洞在寄主星系的整个一生中都在积累质量，而且没有任何征兆显示这种增长有朝一日会结束。它的势不可挡的增重是只许物质进入视界单向流动的结果：恒星和气体从介质被拉进去，但没有任何东西能够逃出来。 19

你会说这个故事是有趣的，它是黑洞之谜的重要段落，但是它还是有些不够成熟，因为我们还没有解释当前如何测定黑洞的质量。归根结底，这是本章的核心问题！这个问题的要点在于，从一开始就要确定特大质量黑洞永远从其周围吸积物质。我们必须认识到它的馈赠习性是我们所知的它存在的主要原因。远距离的天体，正如这些在可观测宇宙边缘的天体，由于太远，我们不能通过它们对其周围恒星运动的影响去研究它们。在许多情况下，我们甚至看不到寄主星系，至多我们只能仅仅抓住它的微弱的光芒。但是我们确实看到了黑洞辐射的巨大能量输出，犹如通过地球大气

传播的无线电或电视信号，从这个天体来到我们这里的光线带来了我们能够解读的线索，同时还带来了关于黑洞大小和质量的信息。

有好几次，哈勃空间望远镜为我们提供了直接的视觉证据，支持我们关于特大质量黑洞持续不断地吸收物质的推测。最雄辩的例子是环绕 NGC 7052（即星团星云新总表中第 7052 号）椭圆星系核旋转的物质的尘埃盘。这个星系位于狐狸座，离地球 1.91 亿光年（参看图 2-1）。它的结构看上去好像太空中的巨大锅盖，可能是远古星系碰撞的遗迹，将在几十

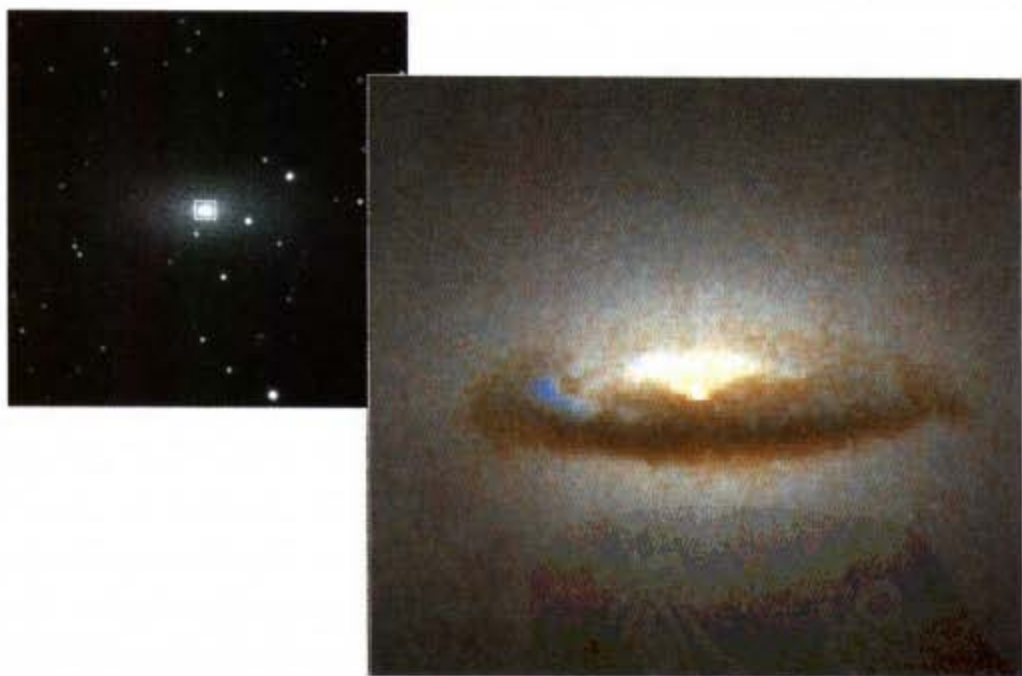


图 2-1 巨大的（直径 3700 光年）、寒冷的气体-尘埃盘包含着椭圆星系 NGC 7052（右下）核心内一个 3 亿太阳质量的黑洞。我们可以看到它在明亮星光背景上的投影，前部显得比边缘较暗，因为来自核心另一边的光线必须穿越厚厚的物质，通过盘的靠近我们的边缘才能到达我们。暗黑的尘埃盘代表冷的外围地带，它向里扩展到超热的区域。引力压缩并加热气体，于是它们在频谱的若干波段产生辐射。左上方的像是用地面望远镜拍摄的 NGC 7052 星系，右下方的像是左上方像中方框区域的放大（承蒙空间望远镜科学研究所的 Roeland P. van der Marel，华盛顿大学的 Frank C. van den Bosch 和美国宇航局惠赐照片）



亿年的过程中逐渐地被黑洞吞噬。这个盘的光线比起星系其余部分显得红一些，因为尘埃吸收蓝光比红光更加有效，日落时的太阳变红也是一样的道理，因为这时阳光通过大气的路径加长了。盘中央的亮斑是聚集在黑洞周围的恒星发出的光线积累造成的。事实上，这些恒星被密集地禁锢在较小的空间内，包围着中心，正好表明附近一定隐藏着一个强大的引力源，否则它们就会丢盔弃甲、四散而去，不至于形成这张像里如此明显的恒星集中的亮点。 20

等离子体的吸积

图 2-1 中环绕 NGC 7052 的核心旋转的尘埃盘，并不说明恒星紧密地聚集在正中央，只是显著地表明了特大质量的天体怎么就轻易地征服了其邻近的物质。因此人们可能对此会感到奇怪，即当前天体物理学家在力图了解黑洞吸积物质时还有困难。毕竟，我们是不是已经对引力的势不可挡的和无可否认的作用深信不疑呢？

月亮不会直接掉落到地球上，由于同一原因，物质也不会直接掉落到黑洞上。它们形成了旋涡，正如冰上芭蕾舞演员把双臂收拢时自转更快。幸运的是，也是由于同一原因，我们的太阳在安全的距离上（28000 光年）绕银河系中心旋转，永远如此——或者至少在几十亿年以后仙女星系与我们碰撞之前如此（参见第 4 章）。

所有这些现象背后的主导原理是：即使指向中心点的拉力十分强大，侧向运动从来就不会消失。对运动的任何改变都需要同一方向的力，当冰上芭蕾舞演员收拢她的双臂时，她向身体作用了一个力，但是她双臂的侧向运动未受影响，为了补偿她原先伸展的两侧的收缩，她的身子旋转加快。太阳经受着指向银河系中心的引力，但是在它沿轨道圆周运动方向上的任何影响是可以忽略不计的。17 世纪，艾萨克·牛顿爵士（Isaac Newton, 1642~1727）以同一方式解释了月亮的运动。他解释说，地球的大卫星确实在向我们掉落，但是由于它有那么大的侧向运动，因此实际上它的向前运动正如它向下运动一样大。最终结果是它永远不会非常接近地球， 21

而是持续不断地、无限期地环绕圆周运动。

类似地，环绕 NGC 7052 的盘中的含尘气体有极大的侧向运动，即使这一系统中心的特大质量黑洞的引力难以想象地巨大，也还是不能把物质直接拉向中心。必须有黑洞之外的某种东西先来消除侧向作用。当星系相撞的时候，正如我们从图 1-5 中的触须星系所看到的，在中心产生的湍流造成的扰动相当大，足以消除作绕转运动气体的侧向运动，导致气体径直向踌躇在中心、虎视眈眈地等候的巨兽掉落。这就是为什么类星体被认为是这种星系交会的产物，同时也是某些类星体显然并不难了解的原因。

最近，俄亥俄州立大学的几位天文学家进行了另一项巧妙的探测工作 [参看 Martini and Pogge (1999)]，看来他们提供了一个领先的直接证据，证实寄主星系的确从远至 1000 光年或更远处开始向中心黑洞径直转移物质——基本上是从图 2-1 的尘埃轂盖的外边缘。

当我们注视银河系的熠熠生辉的旋臂或者近邻仙女星系的引人神往的美丽轮盘时（姑且勿论图 1-5 所示的正在碰撞的触须星系），我们首先看到的是与星光有关的图像。但是恒星是难以从它们的轨道上动摇的，尤其在它们远离核心的情况下，只是在核心处物质才径直馈赠黑洞。所以了解恒星的行为无助于弄明白特大质量黑洞从何处找到它们的燃料。反之，最可能的候选者是气体，或者更确切地说，是弥漫于恒星之间的尘埃和气体的混合物。

- 22 俄亥俄州立大学的天文学家们应用了哈勃空间望远镜在可见光和近红外波段拍摄的寄主星系的像。他们探寻的是由尘埃而不是恒星产生的辐射蕴含的意义。尘埃中的图像也揭示了气体的内在结构，并终于回答了寄主星系如何给中心的宿主馈赠的问题。

恒星发出的辐射非常容易被尘埃吸收和散射，但是在近红外波段比可见光波段要小得多。所以俄亥俄州立大学的天文学家们通过比较两个波段的像，能够把恒星光在像中产生的作用与星际物质产生的作用分离开来。他们的发现实在出人意料：他们看到了大多数星系的旋转图像，其中的一个例子示于图 2-2。

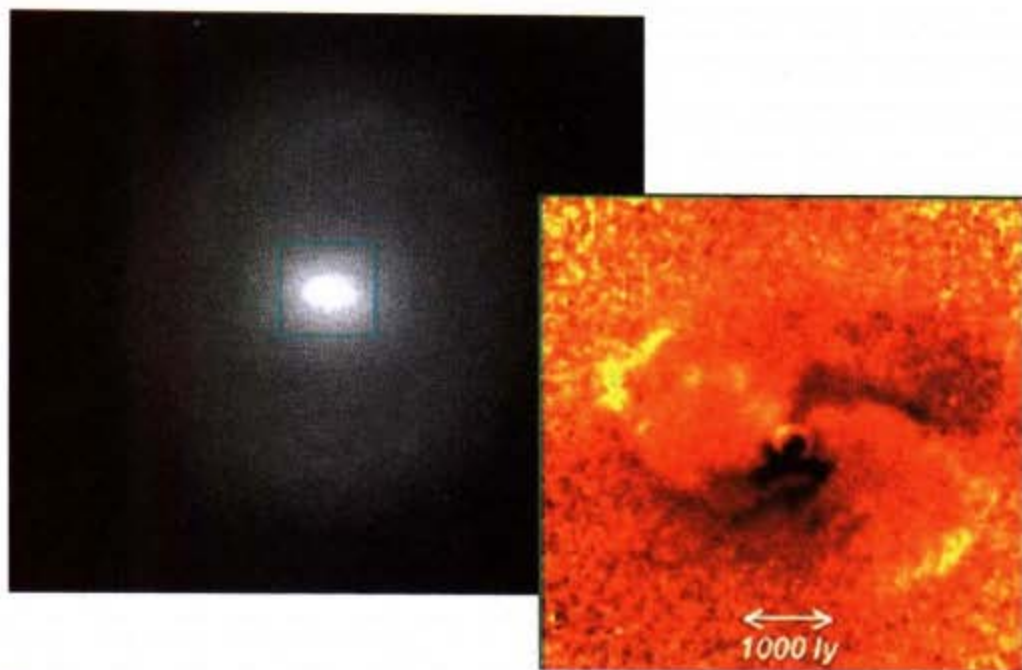


图 2-2 这是称为马卡良 573 的星系的像，用哈勃空间望远镜在可见光和近红外波段拍摄。天文学家已经能够把显示在这些图像中的各种特征结合起来，创造出这种美丽的奇幻图像，展示正向寄主星系核心中的黑洞盘旋着下落的尘埃旋风。左上部的像显示整个星系，右下部的像是左上部的像中方框区域的放大。与银河系和仙女星系这类轮盘状旋涡星系相比，马卡良 573 星系的大小只有其 1/100，这个微型的“混合宿主”为消除侧向运动提供了必要的动力，使得尘埃和气体径直落向星系中心，去点燃特大质量黑洞（承蒙俄亥俄州立大学的 Richard Pogge 和 Paul Martini 以及美国宇航局惠赐图像）

为了理解这张照片显示的特征的程度，设想我们正拿着图 2-1 所示的尘埃盘，并把它转个向，让我们看着它的正面（这两幅图的尺度大致相同）。虽然这样的照片意味着客体在时间上定格，但是这张特定的像的内容则活生生地向我们展示了尘埃和气体的旋涡正在给中心的黑洞补充燃料。与点缀着恒星、席卷整个星系的较大旋涡不同，这个微型旋涡——只及前者的 1/100——看起来与中心源的引力直接有关。

- 天文学家因这个新结果深受鼓舞，因为它以很直观的方式展示了旋涡波的激发如何引起物质向中心的雪崩式掉落。正如声音的扰动在空气中传播，这些波能够携带或者带走能量。此外，由于环绕核心旋转的含尘气体一定会经过这些波，波与绕转物质之间的相互作用能够有效地遏制侧向运动，而正是侧向运动阻止了物质直接掉进黑洞。因此，展示了这一美丽的
- 23 尘埃旋涡波图像的星系很像是寄主星系，有非常活跃的特大质量天体在它们的核心。

设想我们能够飞到尘埃和气体旋风的上空，足够接近特大质量黑洞，从而能够考察强引力效应。可惜，现实中我们还不能这样做，即使通过望远镜去看也不成。这是因为图 2-2 中像的尺度是几千光年，而我们已经从类星体的变化特点了解到集中的质量一定局限在不大于我们太阳系的区域之内，这比这张图中心的暗斑小 300 万倍以上！然而天体物理学家能够用计算机模拟这类事件，并选择适当的颜色来表示气体及其温度，因此他们能创造一幅模拟图像，表达如果我们真能飞到那里将看到怎样的状况。

原来，必须进入与黑洞的距离在 10~100 太阳系直径的范围之内，才能使正在掉落的气体 and 尘埃获得有效的压缩和加热。正如我们将在第 3 章所见，在这一尺度上，黑洞本身将呈现为一个暗黑的圆盘，直径小至上列值的约 1%。这样，在图 2-2 所示的照片中，高度压缩的区域完全包含在中央黑点之中。

图 2-3 是一幅美丽的模拟像，它是用这种方式创造的例子，展示如果我们沿着图 2-1 中尘埃盘的平面趋近黑洞去看，掉落中的气体和尘埃的状态如何——看起来像一个暗黑的中心球。换句话说，图 2-3 显示图 2-1 中在通过“穀盖”的垂直切面上的密度轮廓。这张模拟图像代表 10 倍于我们太阳系大小的区域，其上的颜色标记表明当气体在接近于中央视界时如何迅速地被加热（温度可以达到高至 100 万度——有时甚至 10 亿度），所以没有固态结构可以在这种状态下存在，而是都成为炽热而稀薄的等离子体。

- 24 天文学家知道温度还会升得更高，因为他们有时看到发光物质产生的

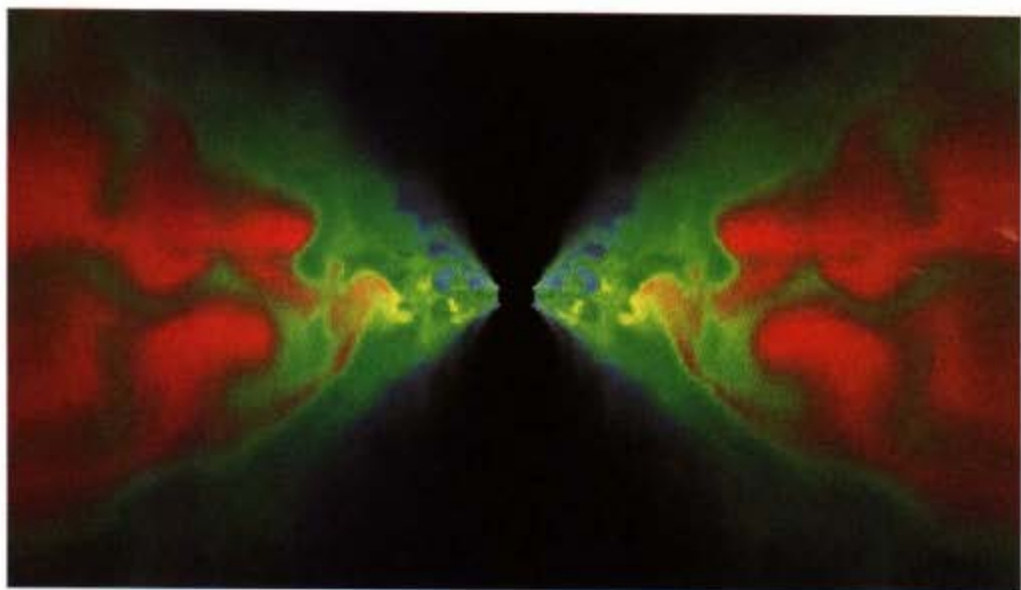


图 2-3 这是一张模拟像，显示如果我们站在图 2-1 的尘埃盘的平面上去看，炽热的、正在掉落的气体是怎样的状态。然而，在我们看到压缩和加热（它们以朝向中心的一系列的顏色改变表示）之前，必须关注中心天体（这里它以一个黑色圆斑表示）周围离其大约 10 倍于太阳系大小的范围；作为比较，图 2-1 的尘埃盘的广度大约是 300 万倍于太阳系的直径。这里看到的以红色表示的翻腾的云团，表明在下落时产生了大量的热量，这些热量并不直接散逸，而是导致气体的逆向运动，以致把一些等离子体沿盘的平面向后扫去（承蒙圣安德鲁斯大学的 Philip Armitage 和马克斯·普朗克天体物理研究所的 Kees Dullemond 惠赐图像）

辐射效应。当你看着图 2-3 所示的模拟像时，请设想你正从上向下注视着黑洞（或从下向上注视着那里的物质）。你将看到大部分气体环绕着中央旋转，在你的方向上形成开口的圆锥。与之不同的是，图 2-3 显示的是观测者在轨道面上所看到的情景，圆锥的开口在图中朝上或朝下。当炽热的压缩气体绕黑洞旋转时，产生的光线会无所阻挡地循着你的方向散逸，但是在通过翻腾着的物质时并非如此。这个效应让我们想到手电筒产生的直射光束：把发出的光集中射向前方，通过一个不透光的罩子防止向旁侧泄漏。

当哈勃空间望远镜聚焦于活动星系 NGC 5728 时（参看图 2-4），发现了一个十分令人瞩目的宇宙型手电筒。从这个天体的核心发出壮丽的双圆锥光束，这是环绕中心的气体的电离过程，在圆锥开口之内看到的红颜色是等离子体受到辐照产生的。天文学家们急于了解向特大质量黑洞掉落进去的气体的性质，这个发现正好为此提供了所有必需的要素，证实了在盘的中心正如所预期的那样存在漏斗形的开口。这一系统里，炽热的压缩等离子体发出紫外光，但是稠密的气体 and 尘埃环阻挡了哈勃空间望远镜直接看到黑洞。反之，一些电离过程中的辐射聚集成束射向开放的圆锥，形成垂直于我们的直线，射出中心之外几千光年。物质环有效地使外逸的紫外光集聚到灯塔的两个窗口，向盘的上方和下方照射。

当盘旋着掉落进黑洞的气体太多，远高于维持稳定的馈赠，就会发生更加剧烈的现象。于是特大质量黑洞试图向外吹走超量的物质和能量，形

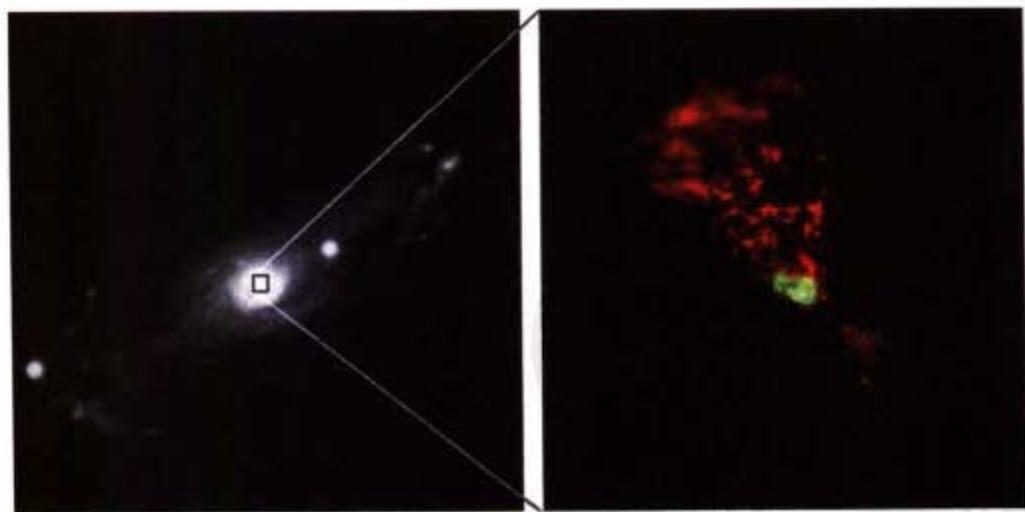


图 2-4 左图为棒旋星系 NGC 5728 的地基像，这个星系位于天秤座，离地球 1.25 亿光年。哈勃空间望远镜聚焦于这个活动星系的核心，发现了从这个星系的核心特大质量黑洞发出的壮丽的双锥形光束（右图）。人们认为，有一个类似图 2-3 所模拟的绕转的物质环使外逸的紫外辐射形成了两个窗口的灯塔，它电离并激发了馈赠中心天体的吸积盘的平面上下两边的气体（承蒙空间望远镜科学研究所的 Andrew Wilson 及其同事、马里兰大学、约翰·霍普金斯大学、雷登天文台和美国宇航局惠赐图像）



成了两个炽热等离子体翻腾的大泡（参看图 2-5）。这两个喷射出的物质大泡，犹如花园里高速充水的水管，猛烈地碰撞到稠密气体的墙上，并使它们发光。在这特殊的景象中，大泡本身大约有 800 光年长和 800 光年宽，很容易适合图 2-1 和图 2-2 所见的尘埃盘的中心区域。在图 2-5 中，



图 2-5 哈勃空间望远镜拍摄的特殊星系 NGC 4438 的核，此星系位于室女星系团，距地球约 5000 万光年。图中，特大质量黑洞正在从盘旋着落向中心的尘埃和气体的暗带吹出一个巨大的泡。第二个大泡勉强可以看到，它翻腾着落向下方黯黑的物质带。这些热泡是由于黑洞无节制地过分吞食被俘获于旋转的吸积盘内的物质而产生的（可见于亮泡下面的白色区域）。物质盘旋着掉落的速率显然极高，以致其中一些从两个相反的方向喷涌而出，犹如花园里浇水的软管充进了过量的水（承蒙耶鲁大学的 Jeffrey Kenney 和 Elizabeth Yale 以及美国宇航局惠赐图像）

暗带上方的大泡看来更加明亮，因为这一边膨胀的气体正在猛烈地冲进周围物质比较稠密的团块内。估计这两个大泡会不断膨胀，直到最终能量消失，这一时间尺度远比星系的年龄短。

特大质量黑洞如何获取它们质量的理论本身，是一个引人入胜的课题，而这里我们已经看到的，几乎还谈不上初步涉足于这个深入探索的领域。现在让我们把注意力转向另一个问题，即这些堂皇的天体集束射向我们的辐射，究竟怎么会提供最终揭示它们大小和质量的线索。追溯已往的历程，鉴于我们已从宇宙的另一端发现了存在这些剧烈的实体，这个答案看来将会十分瞩目。

解读来自下落气体的信号

尼古拉·哥白尼 (Nicolaus Copernicus, 1473~1543) 尝试把宇宙的中心从地球移向太阳，从而创造日心宇宙，起初遭到了主流社会的猛烈抵抗，因为没有人相信地球必须进行与其他行星步调一致的远距离运动。可是，对于今天的读者来说，约翰内斯·开普勒 (Johannes Kepler, 1571~1630) 在支持这一理论时，用多面体几何结构²来解释，看来甚至更加难以理解这能有什么用处。考虑到当时只有 6 颗行星（其他行星还没有发现，而月亮已经被降级到“侍卫”的身份，它的正式的称呼是“卫星”），开普勒写道：

如果一个球能把土星的轨道包容在上，而有一个立方体内接于这个球，那么与这个立方体内切的球将能包容木星轨道。如果一个正四面体内接于包容木星轨道的球，那么这个正四面体的内切球将能包容火星轨道。以此类推，在火星与地球之间放入正十二面体，在地球与金星之间放入正二十面体，而在金星和水星之间放入正八面体。[若想进一步了解开普勒对宇宙学的贡献，请参看 Field (1987)。]



不可思议的是，这个设想不仅考虑到了行星的数目，而且与哥白尼求出的行星轨道大小的符合程度令人信服——只有 10% 左右的误差。几年之后，当牛顿把他的革命性的引力理论应用于太阳系内彗星和行星的运动，应用于月亮环绕地球的轨道，应用于苹果在林肯郡的下落时，一切便走上了正轨。开普勒以他坚忍不拔的努力和寻幽探秘的摸索，试图通过对行星环绕太阳运动的描述来建立上天的和谐。但是牛顿一劳永逸地证明了，行星之所以按开普勒先前导出的经验规律运行，是因为它们在服从逆平方律的引力作用之下。

牛顿引力定律实际上有两个主要方面。在《自然哲学的数学原理》一书中，他阐述了这些思想：“一切事物以引力吸引一切其他事物，引力正比于它们质量的乘积，反比于它们之间距离的平方。”这样，如果知道行星与太阳的距离和为了保持行星永远环绕太阳所必须作用的力，物理学家就足以根据牛顿引力定律求出要求产生这一作用的质量。

27

现在让我们大步向前跨越，在太空穿越广阔的星系际空间直至遥远的宇宙边缘，确实这样。如果我们假定物理定律在“宇宙任何他处”与在我们太阳系内都一样——我们都是在太阳系内证实这些物理定律的——那么牛顿就会来证明，如果知道绕行气体的速度和它与中心黑洞的距离，那么我们就应该足以推断后者的质量。这样，只要我们能够在穿越宇宙的集束辐射产生的许多细节中分辨出适当的线索，我们就会拥有一架宇宙天平来“称量”特大质量黑洞。

天文学家普遍知道，应用这一方法最精彩和最令人信服的事例是对于名为 NGC 4258 的旋涡星系的研究，它在猎犬座，距北斗七星（在有的国家称为“犁”；参看图 2-6）不太远。由日本和美国天文学家组成的国际小组应用洲际射电望远镜，在国家科学基金的资助下，观测到一个稠密分子物质形成的盘正以高达每秒 1050 千米的速度环绕星系核旋转 [参看 Miyoshi *et al.* (1995)]。

这个旋涡星系在离地球约 2300 万光年处昂首前行，大小为 9 万光年，通过从它核心的水蒸气产生的微波辐射（脉泽），它很容易与其他星系识别。“脉泽”（受激辐射微波放大的缩略语）这个词是诺贝尔奖获得者查



图 2-6 亮旋涡星系 NGC 4258 (又称 M106) 正以每秒 537 千米的速度相对于我们退行, 与地球距离约 2300 万光年。它的赤道面的倾斜类似于仙女星系, 许多特征很像我们所知的这个银河系的姐妹星系。例如, 它的尘带形成了明显的旋涡状, 我们可以很清晰地追踪到它的明亮的中心区域。近来, 国立射电天文台的高角分辨率和高灵敏度的甚长基线阵能让天文学家开展对距 NGC 4258 核心 1 光年之内的水脉泽运动进行测量。包含这些脉泽辐射云的盘的结构所代表的中心质量已被测定, 其值接近于 4000 万太阳质量, 这是迄今为止最精确的测量之一 (承蒙艾奥特沃斯大学的 Zsolt Frei 和普林斯顿大学的 James Gunn 惠赐照片)



尔斯·汤因斯 (Charles Townes) 和他的合作者在 20 世纪中叶创造的，之前他们在自己的实验室里成功地演示了微波放大。在这个过程中，气体分子受高能激发而在非常态振荡，当某一频率的光通过这些气体时，就被放大。在 NGC 4258 的核心内有相当多的辐射产生，激发密集地环绕中心旋转的水分子，这导致射电波段的强烈的受激辐射。这些水分子束缚于其中的这个盘与星系本身相比很小，但是它的方向正巧使得它的尖细的微波束指向我们。 28

以这种方式产生的光子束穿透笼罩在中心区域的尘埃和气体，没有任何衰减，能让我们探测核心深处的物质运动。即使这样，这类观测也是不容易开展的。射电天文学家必须应用甚长基线干涉测量³ (VLBI) 技术，把多台望远镜同时接收到的射电信号结合起来，这些望远镜通常相距遥远，甚至相距几千千米。VLBI 设备中主要的一组称甚大基线阵 (VLBA)，它于 1993 年投入使用。这一系统由 10 台直径 82 英尺 (约 25 米) 的碟状天线组成，其设置点横贯美国，从夏威夷群岛到维尔京群岛。全部 10 台天线如一台仪器般工作，由设在新墨西哥州索科罗的操作中心控制。在观测 NGC 4258 时，VLBA 与甚大阵 (即设置于新墨西哥州的拥有 27 台天线的射电望远镜，也用于拍摄类似图 1-8 的美丽图像) 协同进行。

对来自 NGC 4258 核心的脉泽辐射的测量告诉我们，水蒸气正被一个环绕强大引力源旋转的巨大旋涡扫除着，此外，脉泽云看来勾勒出一个非常薄的盘，其运动遵循开普勒轨道定律，准确到 1%，在距中心 0.5 光年处，速度达到约每秒 1050 千米 (速度是由辐射波长的视漂移测定的)。有 3500 万~4000 万太阳质量的物质集中在 NGC 4258 中心周围 0.5 光年的范围之内，这就是我们必须运用牛顿万有引力定律计算的结果。

天文学家们做出了这一奠基性的发现，证明了这一区域内的物质密度至少达到每立方光年 1 亿太阳质量。如果这些质量只是高度集中的星团，那么恒星分离的平均距离只是稍微大于太阳系的直径，由于这样靠近，它们将因彼此间不可避免的灾难性碰撞而不能生存。鉴于我们在测量这个黑暗物质的致密程度时所能达到的高精度，我们把这个蜗居于 NGC 4258 核心的天体看做是我们现在已知的两个最令人信服的特大质量黑洞之中的一 29

个，另一个则是雄踞于我们银河系中心的天体，我们将在下一节更多地谈论它。

然而，大部分类星体和在其核心有黑洞寄居的活动星系并不都像 NGC 4258 那样有利于观测。考虑对我们的工作有利的各种必要因素，就容易理解为什么像 NGC 4258 这类星系确实是特殊的，因而是罕见的。首先，靠近中心天体的条件必须适合于维持一大群受激发的水分子，并当微波透过含尘气体时很容易放大；其次，下落物质形成的盘必须比较薄，而且它的方向正好能让我们看到掠过这个盘面的细微的脉泽光束；最后，寄主星系必须充分接近我们，以便我们能够分辨几个发射脉泽的小云，用来测定它们的相关距离以及速度。由此可见，能用于这项测量的寄主星系的数目自然不多了。

好在天文学家相当聪明，已经有好几种其他方法发展出来，虽然不如利用脉泽那么精确，但能提供关于物质相对于中心黑洞的速度和距离的信息，从而利用牛顿“天平”以相当的精确度求出黑洞的质量。让我们再作一次考察，请看图 2-4，并想象我们在这里目睹宇宙电筒效应，甚至在更接近于寄主星系中心的特大质量天体时，这种效应不变或更加显著。这意味着我们应该面对一种情况，即环绕核心旋转的气体云正受到中心灯塔的
30 辐照，那么它就会以我们能够识别的颜色发光，而且我们能通过特定的原子波长去确认。

就这样，正如马丁·施米特能够满怀信心地证明 3C 273 的不可思议的退行速度，我们也能识别由这些云产生的波长的漂移，用于指示它们的速度。现在，这已不再被看做是异乎寻常地精巧的测量，而是测量黑洞到发光气体距离的常规方法（称为反演法），是相当有创造性的。

通过检测特大质量黑洞发射的光线和独立地测量受辐照的气体云的晕产生的辉光，天文学家能够感知辐射输出变化发生的时刻。这种情况就是，当类星体的亮度变化导致其周围物质的亮度——在经过一定时间的滞后之后——也随之变化。这个延迟显然是由于从中心发出的辐照光线到达气体云需要经过一定时间引起的，既然我们知道光子传播有多快，那么这个滞后就提供了测量核心与绕转的等离子体之间距离的一种方法。就这



样，我们知道了速度和距离，再依据艾萨克·牛顿爵士的思想和他的万有引力定律，就能求出类星体的质量。

银河系中心

迄今为止，我们讨论过的特大质量天体展示了黑洞波澜壮阔的活动。例如，类星体以其从宇宙膨胀早期获得的十足的能量，反映了黑洞的存在，作为现实世界中最不寻常的实体，它们是无取代的。大小并不说明问题。位于我们银河系中心的黑洞人马座 A* 并不是质量最大的，也不是最剧烈的，但是它离我们最近。事实上，它与前述黑洞之间距离的差别竟然能够达到几百万光年！

诸如 NGC 4258 (图 2-6) 这类星系的照片可能会让一些人受表象蒙蔽，以为恒星相当紧密地聚集在一起。其实在一个星系的大部分范围内，恒星占据的体积只是微不足道的极小部分。例如，如果我们把一颗恒星看 31 做一粒樱桃，那么我们要以欧洲的大城市之间的距离去比拟太空中相邻恒星之间的典型距离（几光年）。可是在银河系的中心，大约有 1000 万颗恒星聚集在仅仅 1 光年的核心内。

近来，天文学家应用设置在智利帕拉那尔的欧洲南方天文台的 8.2 米 VLT YEPUN 望远镜（甚大望远镜阵内的 4 台望远镜中的每一台都有一个名字，根据生活在智利圣地亚哥以南 500 千米、比约-比约河南部地区的马普切人所了解的天体取名。YEPUN 是这一系列望远镜中的第 4 台，意思是金星或昏星）拍摄了清晰度前所未有的红外照片，显示了恒星密集区域最明亮的成员，如图 2-7 所示。我们在这里看到的像非常清晰，因为采用了称为自适应光学技术，望远镜镜面即时改变，以修正地球大气的湍动效应。空气的这种运动使远方的天体闪烁不定，并使这类照片上的星像受到扰动而模糊不清。自适应光学原则上能产生高清晰度的星像，甚至比哈勃空间望远镜的像还好，后者主镜的口径只及 VLT YEPUN 望远镜的 1/3。

根据开普勒和牛顿推导出的行星运动定律，天体越接近于它们环绕的中心引力源，就运行得越快。例如，水星是最接近于太阳的行星，每 88

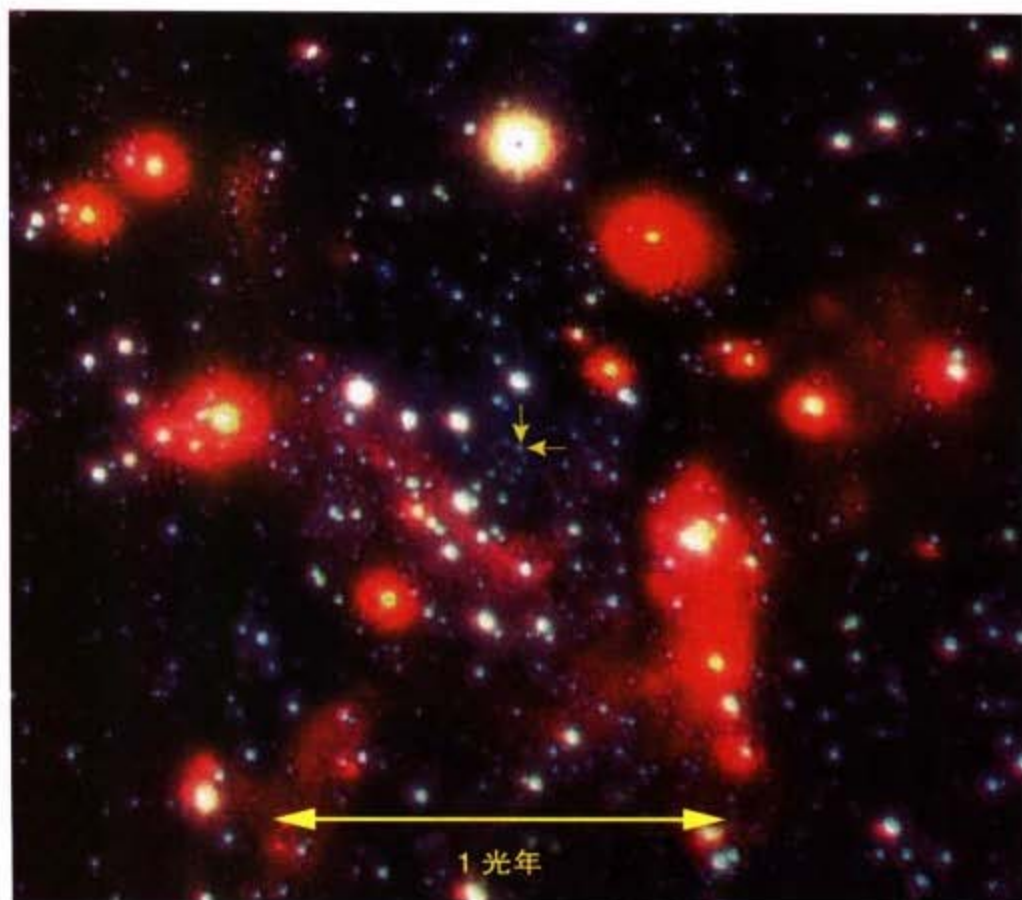


图 2-7 这幅像由设置于智利帕拉那尔的欧洲南方天文台的 8.2 米望远镜所拍摄，提供了银河系中心特大质量黑洞周围恒星的最清晰的景象。通过合成 1.6~3.5 微米的 3 张照片，完成了对这幅像的着色。致密的天体是恒星，它们的颜色指示温度——蓝色是热的，红色是冷的——而弥漫的辐射产生于星际尘埃。黑洞的位置与银河系的中心重合，以这幅像中央的两个黄色小箭头指示。这幅图代表 2×2 光年的尺度，所以由黑洞投射的影子小得不能在这里看到。此外，黑洞在红外波段没有可感知的辐射，因此只有环绕中心旋转的恒星才能在这幅像中看到（承蒙马克斯·普朗克地外物理学研究所的 R. Genzel 等和欧洲南方天文台惠赐照片）



个地球日环绕太阳 1 周，而冥王星在太阳系最远的边沿游移，要花 90465 个地球日才能环绕太阳 1 周。自然，这是容易理解的，因为太阳的引力随着距离的增加而很快衰减——这正是我们用来称量位于寄主星系核心的特大质量黑洞的牛顿“天平”的要点。

人马座 A* 与它在宇宙中其他处的兄弟相比，离我们非常近，以致在诸如图 2-7 之类的像上我们能够鉴别单个恒星，它们在离中心引力源只有 7~10 光日的距离处绕行 [这项成果是全球几家天文台的共同贡献。主导 32 应用这些技术拍摄银河系中心像、取得这项成果的主要研究者有 Andrea Ghez、Mark Morris、Eric Becklin 和他们在美国加州大学洛杉矶分校的合作者，还有 Reinhard Genzel，Andrea Eckart（现在在科隆大学）和他们在德国加尔兴的马克斯·普朗克研究所的合作者]。在仙女星系这个离银河系最近的大星系的核心，当前最好的情况是我们能够对 2 光年的范围详加观测。

由于离特大质量黑洞这么近，恒星以令人眼花缭乱的速度绕转，最高可达每小时 500 万千米——即使我们离银河系中心远达 28000 光年，我们还是能够实时看清它们的运动。事实上，它们的运动如此迅疾，以致天文学家能够从相隔几年所拍的照相底片上，轻易地检测它们位置的移动。它们的难以置信的移动速度使得我们现在能够以令人咋舌的精度清晰地追踪它们的轨道，显示的周期短到 15 年！请把这个数值与太阳环绕银河系 1 周所需的 2.2 亿年做个比较吧。

迄今为止，对环绕黑洞旋转的恒星所做的最精彩的证认 [这项发现发表于《自然》杂志（2002），由在马克斯·普朗克地外物理学研究所的 Schödel 领导下的一个大的天文学家团队完成] 发表于 2002 年 10 月，这是由一个国际天文学家组成的团队应用具有无可比拟的集光能力的 VLT YEPUN 望远镜拍摄的令人惊讶的图像（图 2-7）。如果你仔细观看这张照片的中央，你会看到一颗较暗的恒星——它的符号是 S2——位于表示黑洞所在位置的右上方。虽然 S2 的质量约为太阳的 15 倍，大小为太阳的 7 倍，它还是不同于一颗“正常”恒星。

在这张照片上恒星如此密集的情况下，看到重合的恒星并不令人惊

奇。可是，使人愕然的是，在对恒星 S2 跟踪观测 10 多年之后，天文学家发现它的运动轨线描绘了一个完美的椭圆，其焦点正好在特大质量黑洞所在的位置。这张照片约在 2002 年年中拍摄，当时 S2 正好在离黑洞最近的位置（称为近黑洞点，与离开最远的那一点相对，后者称为远黑洞点），使得它看上去正好位于图 2-7 中心的右上角。

在这个位置上，恒星 S2 离黑洞只有 17 光时——大致上是太阳与冥王星距离的 3 倍，而它以超过每秒 5000 千米的速度运行，这是在曾经做过的这类轨道和速度测量中最极端的例子。确实，当这张照片到手的时候，天文学家认识到恒星 S2 正在靠近中心进行快速绕行，创造了一个不仅能测定引力源的精确位置，而且还有它的强度，从而决定它的质量的前所未有的机会。

S2 看上去是最接近位于银心的人马座 A* 的恒星，应用牛顿万有引力定律，我们推断，支配如同 S2 这样的恒星运动所需要的质量是 260 万个太阳，压缩在不大于 7 光日的区域内，很可能刚好是最近这次发现的 17 光时。正因为这样，人马座 A* 和它在 NGC 4258 核心内的堂兄弟被天文学家认为是迄今为止发现的特大质量黑洞中被最精确地“称量”过的，后者的发射微波的脉泽透露它的质量为 4000 万太阳质量。

在下面几章里，我们将更深入地探讨这些天体的性质，探讨为什么它们作为宇宙结构的基本建筑组元正越来越多地被发现。看来太空中弥漫的多达一半的辐射是由这类巨型实体产生的。有一些在混沌的太初曾经在这里，也许甚至在我们所知的星系形成之前，而所有一切将在这里直到终极。

3 黑洞的时空

拉丁人定居于台伯河两岸，在公元前 7 世纪建立了城市，随后主导了 34 文明世界的大部分。他们用 *gravis* 这个词表示重的或者严重的，用相应的名词 *gravitas* 表示沉重和重量。我们现代的词 *gravity* 和它的更精确的派生词 *gravitation*，可以从这早期的用法追溯它们的根源，而后者还有更古老的来源，这包括梵文 *guru*（意思是重的和古老的）等。显然古人对于物质的这个永恒的性质了解得十分清楚——即存在朝向地球的不可动摇的吸引——虽然直到伽利略和牛顿时代，重力只局限于一个描述现象的名词，没有任何定义，甚至没有恰当の説明。

不可超越的引力

在 17 世纪末，人们试图研究物体由于外界影响改变运动的情况，主要着眼于人们容易鉴别的力的性质。例如，在歌利亚（Goliath）死亡的故事中，大卫（David）¹ 在发射弹弓之后，石块疾驰击中他的前额。少年斗士大卫以他的手发出力，通过弓弦传达到石块上，在此之前他能够控制石块的运动。牛顿认为地球一定对物质作用着引力，因为万事万物都向同一方向下落。可是，这个作用看来相当深奥，因为地球没有用明显的方式发力把物体拉向自己。显然，影响必定是以某种“超距作用”产生的，这就是说，一个物体感知另一物体存在，只是通过它出现在不同的位置上。牛

- 35 顿很自然地把引力看成是特殊的力，因为它的表现不同于其他力，例如用手去推或者用链条去拉，而且他发现这是很难以处理的。

当然，现在我们知道这种差异只是一种假象，产生于力作用时的不同尺度。绳索或手作用的力是宏观表现，等价于微观上引力的“超距作用”，除非施加作用的是电磁力。这本书在你手上而不落地，原因在于每一个荷电粒子之间存在斥力，它阻止了前者的向下运动。但是这个静电的反作用是通过两个粒子之间的空间传递的，非常类似于地球与月亮之间的引力作用——电子与原子中的其他组元永远不会真正“接触”。

牛顿面对引力超距作用的性质感到焦虑不安，这是不争的事实，然而他大可不必如此，因为现代物理学家采取完全不同的观点去看待粒子之间的相互作用。引力与电磁作用力之间的似是而非的差异已不再站得住脚，在本章稍后，我们将从理论上说明，事实上仅有一种统一的作用力，引力与其他作用力只是它的不同表现形式。

经典的引力理论，即认为一个物体吸引另一个物体的力正比于它们的质量，反比于它们距离的平方，是科学的一个最辉煌的胜利。它的预测以令人震惊的精确性被观测所证实。例如，1846年英国的约翰·库奇·亚当斯（John Couch Adams, 1819~1892）和法国的让·约瑟夫·勒威耶（Jean Joseph Le Verrier, 1811~1877）根据天王星运动的轻微反常，预言了海王星的存在²，就是这个理论最主要的成就之一 [预测并终于发现海王星的故事突出显示了早期研究者所面临的困难，他们缺乏通讯手段，难以协调，设备简陋。这个故事是摩尔（Moore）（1996）讲述的]。

- 36 就我们所知，牛顿引力定律可以应用于相距任何距离的天体之间，虽然物理学家还不确切知道应该怎样解释宇宙膨胀正在加速而不是慢下来的新证据。直截了当地考虑这个物理定律，会想到既然所有物质都在吸引所有别的物质，结果就是指向“内部的”引力会使膨胀慢下来。但是向越来越遥远的过去回顾，用最大的望远镜考察最遥远的可见天体的运动，天文学家发现宇宙早期膨胀的速度低于预期值。

现在要说由这一发现能得出什么最终结论还为时尚早。有些理论家认为空间包含迄今为止未见能量场（“暗”能量），它的压力对引力起反作

用，很像空气充进气球能够使气球膨胀，即使有其他的力（例如橡皮的弹性）正在奋力使它收缩。另一些人认为，这种加速膨胀是物质的奇异形式的证据，表明一种斥力，而不是引力，从而显然要求修改牛顿引力定律[关于这一主题的最新思想可参阅 Ostriker and Steinhardt (2001)]。但是，要是果真这样，即使有一点改变，对于用万有引力定律描述星系或更小尺度不会有丝毫冲击。所以，对于讨论特大质量黑洞的性质，牛顿简明的平方反比律无论如何是一个良好的出发点。

不过，尽管这么说，引力的某些方面在所有尺度上直到今天还有深邃的奥秘，这是千真万确的。不论我们向天空的哪个方向看去，它的影响是占压倒优势和漫无止境的。我们习惯于快速决策、吃快餐和快节奏的生活，但只能无可奈何地关注宇宙以倦怠的步态在受迫状态下慢慢改变。宇宙的深沉和广漠，在一定程度上映衬了它的庄严，尤其是引力的双重性——既总是主导的作用力，又很微弱——却深深地困扰着物理学家。

例如，在地球表面，有的东西会松脱，并且“砰”的一声掉到地上。³⁷但是如果你放一枚铁钉在桌上，甚至只要拿一块玩具磁铁去吸引它，就足以把它从地球引力的牵制中“扯夺”过来。尽管是我们整个行星的引力把钉子固定在位置上，由小小的磁铁作用的电磁力却远远强大得多。

科学家把他们的注意力从宇观之大转移到微观之小上去，深入探测原子或原子核的结构，与把单个粒子束缚在一起的作用力相比较，引力的作用是完全微不足道的。在这个尺度上，物质结构完全处于非引力影响之下，它们的不可思议的强度把各组元压缩在相当小的体积内。这样，一个原子比一个星系远远小得多，因为把电子束缚在中心荷正电的核周围绕转的电磁作用力，比在银河系内绕转的恒星之间相互作用的引力，要大 10 的许多次方倍。

在大尺度上，这种令人惊诧的强度差异产生了电中性的物质团块。荷电的等离子体由于受到来自周围不可抗拒的电作用力，而不能处于孤立状态。这样，引力占优势，至少是在行星系或星系的尺度上，因为在这样的距离上唯有它保持着影响。这一部分至少是容易理解的，但是使物理学家困惑的是某些比尺度大小的差异更微妙的事情——他们必须面对这一事

实，即当尺度大小受引力规定时，同与其他任何一种作用力有关的方面相比较，却存在与尺度无关的方面。换句话说，即使其他作用力在强度上彼此相差很大，但是引力却无可比拟地微弱，这种情况称为“等级问题”。

用更具体的话来说，两个电子之间的引力比起它们相互之间的电斥力
38 要微弱到 10 的 43 次方分之 1。要使一对电子之间的电斥力和引力相等，必须让每个电子的质量增大到百万亿亿倍。（顺便提一句，为产生这么重的粒子所需的能量称为普朗克能量。）

所以为什么我们一定要为此而烦恼呢？好吧，首先当物质从尺度为星系或恒星的比较弥漫的结构向黑洞的视奇点转移时，它的特性可能会有可观的改变。随后，天体物理学家需要比他们现在更清楚地了解，当物质坍缩到这种程度，以致基本作用力重新调整它们的强度时，究竟发生了什么。例如，假设在非常小的空间尺度上，有某些迄今为止我们没有预见到的因素导致引力在“等级差距”之间搭桥，并与其他作用力并合——甚至可能与它们统一起来，那么这是否将排除奇点的存在？

用不着惊讶，理论物理学的一些最辉煌的工作正是涉及这个问题：在全面地描述自然界的基本作用力时，我们应该如何把引力包含在内。这个课题中最吸引人的思路的关键在于，除了日常我们生活于其中的三维以外，可能存在额外的空间维数。

看不见的维数

在果壳内，这个假设是成立的，即由于电磁作用力和其他作用力被约束在只是我们所熟悉的三维空间（加上一维时间）内起作用，而引力在所有维内无约束地产生影响，那么引力才显得微弱。这样，我们在三维世界里所经受的只是引力所起作用的一部分。

无论对于物理学家还是非物理学家，额外的维数这种提法都是奇怪的，尽管这一概念从历史渊源来看正趋于成熟。“维”这个词正在被许多
39 方面使用，常常缺乏其真实意义的一致性。维的意义在于当我们沿某一方向运动时，对于这一空间内的另一给定直线的距离保持不变。这听起来可

能很抽象，但是在现实中，人类构筑的居住环境正符合于这个规则——突现了我们世界的三维结构——这是毫不含糊的。让我们设想进入一个房间，它的形状是典型的长方形箱子，或者简直就是一个立方体。现在让我们从这个房间的一个角落出发（譬如说为了确定起见，让你的右肩贴着墙壁），向邻近的角落移动。在你这么做的时候，你要注意的是你与左边墙壁之间的距离保持不变，从你的双脚到天花板的距离也保持不变。

从房间的一个角落出发，你能够实实在在地选择3个不同而且独立的方向运动，并产生同一效果。但是循着此外的任何方向，例如循对角线，那么你与墙壁的距离将每迈一步都有改变。因此这个立方体的房间明确地定义了三维空间。

然而，并非所有的空间一定都是三维的。沿着一个巨大球面爬行的蚂蚁，定居在一个二维世界，因为它们对于给定轴线保持常距离运动时，的确只能沿着两个独立的方向，这些方向是固定于同一球面上的。处于这种环境下的蚂蚁，不能奢望在通向球心的半径上运动，因为半径构成了第三个独立的方向——本质上是我们的三维房间里的向上和向下的方向。

就其他某些重要的原因而言，这种特殊类型的空间很有趣，涉及这一事实：它是无界的，但是有限的，而且多方面相连。一只蚂蚁沿着球面爬行，能够毫无止境地继续它的行程；它可能无数次重复它的路程，沿着圆球上的整个圆周踽踽而行，但是永远没有尽头。然而，数学家都说这是有限的，因为由球面覆盖的面积的大小是有限的。这个空间也是多方面40 相连的，因为球面的任何给定点可以通过多个——实际上是无数多个——路径到达。

在对于维数的推理中再进一步，显然，一个单一的圆周蕴涵的空间代表一维世界，因为一只蚂蚁只能沿一个方向爬行。这个空间虽然是有限的（由于与球面相同的性质），但也是无界的，它在方向上是多方相连的，因为蚂蚁能够在这个高度局限的世界里按顺时针方向或逆时针方向到达圆周上任何给定点。

当代的物理学家和数学家们顺着这样的思路，透过想象触及的问题是，大自然是否会由于所有的维数不超过三维，或者是否由于我们可以在

三维空间行动，类似于蚂蚁在二维的球面上爬行，从而“选择”三维空间让我们活动。既然我们能轻易察觉一维和二维，也就没有先验的理由假定三是终极的维数。

能够存在四维的多维空间（这是规范的称呼），而我们的三维空间是它的表面——正如蚂蚁的世界是包容在球的三维体积上的二维表面——这是格奥尔格·黎曼（Georg Riemann, 1826~1866）于 1851 年在其博士论文中首次描述的。但是，直到在当时并不知名的普鲁士数学家戴奥多尔·卡鲁扎（Theodor Kaluza, 1885~1954）向阿尔伯特·爱因斯坦提出了一个深奥的关于四维空间的建议之后，这个观念才受到重视。在引入了额外的一维以后，他在写于 1919 年的一封信函中证明了引力场和电磁场可以统一于单一的本质，只是在投影进入我们的空间时，它们才显示为不同的分量。爱因斯坦为这一思想非凡的独创性所感动，资助卡鲁扎的论文于 1921 年发表。

- 41 之后不久，卡鲁扎先前的一名学生奥斯卡·克莱因（Oskar Klein, 1894~1977）于 1926 年提出空间的第四维可能是紧紧地卷曲起来的，以致它在空间的亚原子范围内不能探测。这一发展具有历史意义，因为卡鲁扎-克莱因瓶——这是后来这个致密的额外一维的称呼——成为当今弦理论的基础。[关于弦的比较通俗的描述可见于 Brian Greene (2000)。关于卡鲁扎-克莱因理论的引论，参见 Lee (1984)。]

弦理论现在成为理论物理学最活跃的一个分支，许多原先兴趣在于粒子性质及其相互作用的积极研究者，他们中可能多达一半的人已聚集于这一课题的大旗之下。这是一种对现实世界的描述，其中最微小的实体是很短的、漂浮在时空中的弦，而不是科学的、各学科中广泛确立（然而现在已经过时）的点状结构。在这一理论中，空间最可能的维数是 10，若包括时间在内则是 11。不过，寻求关于引力相对于其他作用力极端微弱的解释，并不需要与弦的概念相结合。

发生这一情况的原因在于，不论粒子是点还是弦，存在额外的维数将导致引力源发出的引力迅速减弱。1998 年，粒子物理学家尼玛·阿卡尼-哈默德（Nima Arkani-Hamed）、萨伐斯·迪莫珀洛斯（Savas Dimopoulos）

(那时两人都在斯坦福大学)和贾·德华利 (Gia Dvali, 那时在意大利的里雅斯特) 发表了一篇颇受争议的论文, 提出所存在的两个或更多的空间维数不是如主流的弦理论所主张的那样卷曲在亚原子的尺度上, 而是大到几毫米的尺度 [参看 Arkani-Hamed, Dimopoulos, and Dvali (1998)], 这篇论文的发表引发了关于维数与引力强度的关系的研究热潮。这种隐藏着的庞大维数, 原则上可以从牛顿引力出发, 用新一代更加灵敏的桌面上的实验来探测。

为了明白引力的强度如何取决于维数, 让我们考虑下面简单的类比。设想有一群实验人员挤成一团, 每个人都面朝人群的外面。如果人群形成 42 紧密的圆圈, 每个人一定向外注视着半径的方向。他们开始行走, 并在他们迈进时保持圆周的形状。毫不奇怪, 随着圆周的扩大, 每个人之间分开的距离也在增大。要点在于, 即使人数永不改变, 随着他们远离中心, 圆的周长越来越大。

不要白白浪费精力, 我们要求实验人员在走的同时清扫地板。但是我们注意到随着圆圈扩大, 他们发现越来越难从事这项事务, 因为每个人要清扫的区域随着其经过的距离而增大。

如果我们能以某种方式把我们的实验人员放置在一个球面上, 并且对这种类型的空间按同样的方法进行实验, 我们将发现与他们中每个人相关的区域比之前增大得更快, 因为面积随着他们经过的距离的平方而增加。增加一维, 人群密度将随着实验人员远离中心减小得更快。

在四维空间内的三维表面上, 每个人需要清扫的区域正比于其经过的距离的立方。显然, 随着我们越来越多地增加空间维数, 这个趋势无休止地继续。引力的影响, 在这里我们用工作人员的清扫能力来比喻, 随着离引力源的距离的增大而衰减。但是, 关键之点在于我们空间的表面“面积”随着维数的增加而与距离的越来越高的幂次成比例地增大。所以, 维数越大, 影响的递减率也越大。

倘若我们试图根据现实的维数和事实用语言来表达这些思想, 那么, 从以上多少有些抽象的推论里得出了出乎意料的结果。首先, 我们被这一事实触动, 即用于解决等级问题所需的维数取决于每一维有多少大。我们

- 43 知道：牛顿对引力的规定——它反比于两个物体之间距离的平方——对于太阳系内的行星，对于环绕银河系中心旋转的恒星以及显然还有对于宇宙的膨胀，都是成立的。这样，至少在这些尺度上，一定正好是 3 个空间维数，因为在这种情况下引力的强度随之减少的幂次——距离的平方——比维数小 1。

我们也知道在这么巨大的距离上，引力的影响与自然界的其他作用力相比是惊人的小。在大尺度上引力如此微弱的原因，可能是在非常接近于引力源的地方发生了衰减，支持了存在额外维数的观点。然而，若要让这种说法成立，额外的维数一定以不大于我们当前能测知的大小，缠绕在引力源上。取最简单的方式——加上 1 个新的空间维数——已经被证实行不通，因为要使引力的强度充分衰减，它的半径必须大致上等于地球与太阳之间的距离。

2 个额外的维数能够解决等级问题，如果它们的广度大约为 1 毫米——正好是我们当前明确知道的引力终结的距离。在本书写作之际，有 10 来个研究群体正在从牛顿引力（它与距离的平方成反比）出发，在这些小的、甚至微观的尺度上热切地探索着。最近在罗马举行的关于广义相对论的马塞尔·格罗斯曼会议上，这些团队中的一个报告了初步结果。简斯·衮德拉奇（Jens Gundlach）代表华盛顿大学的爱奥特-瓦什实验室报告了用他们的研究组专门设计的扭秤在距离小到 0.2 毫米的情况下已经发现了额外维数的某种证据 [参看 Gundlach and Markowitz (2000)]。

- 如果额外的维数多于 2 个，它们甚至还要更小，而且如果弦理论确实是对自然界的正确描述，它的 7 个附加的空间维数（除了我们生活于其中的 3 维以外）将不大于铀原子核的大小。这就是为什么天文学家对于引力的这种基本改变毫不关心的原因，因为在这么短的距离上引力强度的急剧增加丝毫不影响行星、恒星和星系尺度的天体保持常态。
- 44

然而，有意思的是，即使尺度小到铀原子核那样，物理学家应用下一代粒子对撞机实验，还将可以理解它们。大约到 2010 年，总部设置于瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）实验室中的大强子对撞机，能用比铀原子核内包含的大 1000 倍的能量打碎粒子。在这种对撞中，能够看

到引力能量从我们的三维空间大量向外泄漏的证据。如果空间额外维数的论断正确，而且在这种预测的距离之内引力的强度急剧攀升，那么物理学家就能预期引力能的丢失。一个更不肯定的假设认为，引力对这类小尺度施加影响，实际上会导致微黑洞大量产生，可是，由于它们太小，因此不至于对我们产生任何问题，因为它们会在极其短暂的时间之内辐射掉全部能量并蒸发干净，当前我们的仪器还不足以测量这么短的时间。

我们的后辈将多么幸运啊，他们将一定会了解我们现实世界的维数结构，而且推而广之，可能揭示与我们这个宇宙平行存在的其他宇宙，它们在仅仅1毫米甚至更小的距离之外！天体物理学家普遍同意，发展这一理论的关键在于解决特大质量黑洞的秘密。给予足够的时间，甚至微弱的引力也将最终导致物质坍缩到极高的密度，从而发生本节叙述的种种效应。因此让我们追随这一思想，并遵循当代物理学定律揭示的规律，去了解物质掉进视界深渊的终极命运。

物质无法抗拒完全坍缩

既然引力是在宏观的距离内起主导作用的力，显然它的不可抗拒的拉力总会导致物质的强烈积聚。会有什么事物阻止它呢？

当然，答案是肯定的——尽管是暂时的。例如，太阳比我们的行星重得多，为了维持自身，抵抗最终的坍缩，它已经经历了40多亿年。除了我们在第2章里讨论的侧向运动提供支持以外，粒子不能轻易地相对流动，所以当它们之间的碰撞变得十分频繁时，任何进一步的压缩都会受到阻挡，至少被延缓了。

顺着这条思路思考。进入一个很大球室参加活动的宾客起初几乎不遭受任何阻碍，因为有很大的空间容纳他们。然而，随着人群密度的增加，个体之间的挤撞终于阻止了任何更紧密的拥挤。一旦由此出现的相撞和挤轧的力遍布整个房间，进入的人流就会停止，进入这个空间的宾客的最终人数取决于他们有多大的自如程度。沉沉稳稳和安安静静的一群人可以非常稠密，因为他们的行动受到抑制，可是热情奔放和精力充沛的一群人，

虽以他们的活动让空间充满生机，但使个体之间分散。然而，当活动快结束时，宾客开始疲劳，球室内整体的激情降低，所以从他们的挤撞和运动中产生了更多的向外的推力。这种等待开门外出的情绪最终会渗透到往中心越来越密集的人群中去。

在一个物质团块内，抵抗引力的灾难性坍缩的外向压力，首先是由于压缩产生的热量（由于同样的道理，当我们给自行车轮胎充气时，打气筒内的空气受压缩而发热），其次是由于核燃料的燃烧过程——这个过程把氢转化为氦，然后是碳、氮、氧等，依次形成了一个直至重元素的链。然而，即使在一个巨大的气体球内，这样所能产生的热量终究有一个限度，因为最终所有的燃料都将转化为铁，它是再也不能在热核反应中燃烧的。核心中积聚着灰烬，随着时间的推移变得越来越多。物质在它的热量散失后的第一场主要战斗中输给了引力，通过收缩把密度提得更高。引力非但
46 不减轻它的力度，反而继续把这个成长中的巨兽推向完全坍缩的悬崖。

但是，当物质的密度越来越大，以致泛滥于介质中的电子开始在相互的位置中重叠的时候，令人十分惊讶的事情发生了。必须面对的效应是把我们的三维空间的主要性质与量子力学的规则紧密结合。这个出人意料的现象的基础——以及为什么我们要在这里考虑它的原因——是观测到当一个物体旋转 360° ，它回到一个状态，看上去在几何上与原先一样，但是事实上相对于它的周围却迥然不同。需要再做一次整周的旋转（总共 720° ）才能使物体恢复到原来状态。

下面介绍一个绝妙的实验来证明以上说法。取一个小的立方体，在每一面漆上不同颜色以使它们相互区别。然后把这个小立方体放在一个较大箱子的中央，再把8个顶点的每一个与容纳它的箱子的相应的角落用绳子相连。绳子要留得足够宽松，以便你能旋转这个小立方体，并且当绳子绕紧时你还能操纵它。现在把这个小立方体旋转 360° 。绳子缠绕起来了。你没有办法使绳子散开，而且你会发现不可能让每一根绳子从小立方体的顶点到箱子的角落顺着一条直线。

把小立方体绕同一根轴再一次转过 360° ，你会发现绳子看上去缠绕得更紧了。但是这只是一个假象，因为这个小立方体和它与箱子的连接，现

在实际上已回到了实验开始时的同一状态。真不可思议，只要稍微整理四周的绳子，小立方体就彻底恢复原样，完全回到初始状态。在旋转 720° 之后，各条绳子的状态也复原如初，在小立方体的顶点和装着它的箱子的各个角落之间形成直线。

其他方式的旋转也会产生这个结果，但是必须旋转 720° 的倍数。例如，完整地旋转 1440° 或 2160° ，也能让小立方体相对于周围的方向不变，并摆脱缠绕。显然，在三维空间中有某些事情与方向的几何学有关，当我们仅仅关注小立方体的表面时并不在意这一点，因为没有绳子，小立方体在只转过 360° 之后，它的状态与开始时看起来完全相同。

幸好还有一个甚至更为简单的演示——称为菲律宾葡萄酒舞蹈，如果用小立方体的实验并非简单易行，那么菲律宾葡萄酒舞蹈的效果是每人都能体验的 [有著作专门描述关于空间缠绕的这个菲律宾葡萄酒舞蹈和其他演示，请参看 Bernstein and Phillips (1981)]。把你的右臂弯曲起来并取一定方向，使得肘部指向上方，让前臂和手垂向地面。然后你弯下腰来，使得右手的手掌向上。放一只酒杯——我们中的灵巧者会先让人斟满葡萄酒——在你的右手掌，你慢慢地让右手平行于地面旋转 360° 。你的右手和酒杯这时应该与原先有相同的方向，但是你的前臂已经缠绕起来，而肘部指向地面。如果你继续把手上的酒杯再次旋转 360° （完成这种克利奥佩特拉式的运动），将把它恢复到原来的状态和位置。你的前臂不是越缠越紧，而是回复到原先的形态和方向。

三维空间的这一基本性质对物质的性状和我们的现实世界普遍地产生了十分深刻的影响。在自然界，有两个主要类型的粒子——一类与上述效应无关，另一类受这一现象的影响非常明显和重要。我们在上一章里讲述过侧向运动，原因正在于，如果外界环境迫使侧向运动局限在原子大小的空间区域内，那么它是量子化的。例如，如果我们能够把一只转动着的球压缩到任意小的尺度，自然界将赋予它的自转速率以某些离散的数值，而在这些数值之间不可能再取任何数值（应用这一类比多少有些靠不住，因为基本粒子的自旋显然与某种有形和延伸物体的旋转运动无关。可能这种运动发生在微小的、在我们的三维世界里不能直接感知的额外的多维之内）。

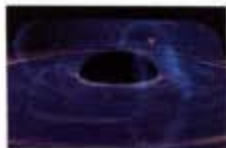
区分这两类粒子的因素是，它们的自旋在向事先选定的某个方向上的投影是否能够为零。对于这个问题给出肯定答案的粒子称为玻色子，另一类称为费米子——为了纪念两位传奇式的物理学家玻色和费米。玻色子的一个普通例子是一个粒子完全没有自旋，因此不管我们从哪个方向去看，它的自旋的投影效应总是为零（我们将对某些粒子——例如光子——不作这种讨论，它们没有质量，以光速传播。对于它们来说，自旋的状态也是不同的）。某些粒子，如电子、质子和中子——即原子的主要组元，总是具有自旋并具有一定的离散值，而且不论我们选择什么方向，自旋的投影永不为零（这是超越量子力学确定的侧向运动量子化的夸张说法，因为如果自旋投影后给出的分数值即使落入允许的离散值的有限个数之内，这些值也未必存在于自然界）。

这样就在量子力学的规则与三维空间显著的定向性质之间建立了联系。我们的缩小了的自转球的旋转运动和粒子的自旋是把这些物体与它们的周围环境牵连在一起的“绳子”。自旋在投影后能够取零值的粒子没有被拴住，经过 360° 的旋转后，它们能切实恢复原来状态。如果我们割断连接前面那个多色小立方体的各顶点与装着它的箱子的各对应角落之间的绳索，我们遇到的就是这种情况。然而，费米子总是被连接着的，因为它们有自旋，可以指向周围空间的任意方向。因此，在旋转 360° 之后，它们就

49 处于一个不同的状态，这种与原先状态的偏离，是很容易鉴别出来的！

量子力学与这个故事有关的第二个规则是，如果同一类型的两个粒子具有相同的能量和其他动力学性质，它们是完全不可区分的。如果我们把两个电子放在一起，在任何情况下，我们都不可能通过跟踪它们所在的位置去区分它们。这样，为了描述这种情况，我们必须引入概率——即第一个粒子在左边和第二个粒子在右边的可能性以及第一个粒子在右边和第二个粒子在左边的可能性。正是在这里我们首次遇到了三维空间中特殊的定向问题。

原因如下：一旦我们知道有两个电子占据了相邻的两个位置，那么我们也就知道这两个粒子中的每一个都可能处在这两个位置的任何一个上，因为它们是不可区分的。但是第一个电子在左边和第二个电子在右边组成



的几何结构对于第一个电子在右边和第二个电子在左边的几何结构来说，要正好转过 360° 。由于两个电子没有连接，单单让其中的一个绕另一个旋转 180° 是不够的，第二个电子也必须独立地移动到第一个电子曾经所在的位置。所以合起来是两个电子各自旋转 180° ，产生了 360° 的总体旋转（参看图 3-1）。

然而，由于前面描述的定向效应，这个变换了的构形与原来的不一致了。在量子力学中，由两个粒子组成的同一系统必须同时占有两个不同的状态，这一事实导致这个构形不能保持系统的平衡！

只有一种方式去确定这件事——这就是赋予电子以一些性质，使得它们占据可以区分的状态。换句话说，当诸如电子之类的粒子彼此相当接近，以致相互的位置开始重叠，它们的情况就会起变化，否则它们干脆就不能一起存在。这种情况是它们的能量，或者可能是它们相对于原子核的侧向运动的能级。对于玻色子，永远不会发生这种情况，因为旋转 360° 不会改变它们的状态。这样，自然界允许它们的任何数量都可共存，不论它们是否可以区分。例如，这些年来物理学家们发现了一些创造称为玻色-爱因斯坦凝聚的状态的方法。简而言之，这意味着能够建立起大量玻色子

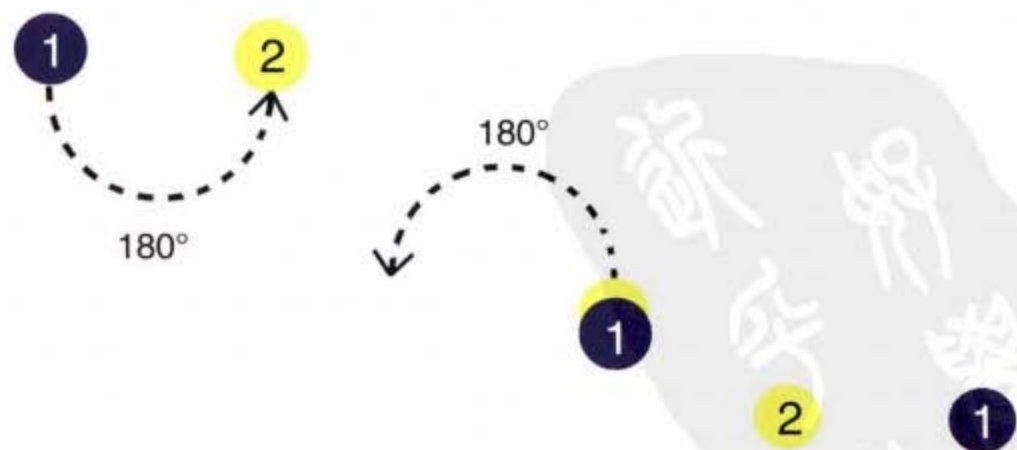


图 3-1 如果第 1 个电子占据位置 1，而第 2 个电子占据位置 2，两个电子自转 180° 要求调换它们的位置。因此在自转 1 整周即 360° 之后，在三维空间的定向成为决定这个系统是否处于原来状态的一个因子

都凝聚在一个非常低的能态——同一状态的粒子构形。

但是，这对于费米子——原子、分子、细胞和生命的主要组元是不可能的。不论它们以多少数量聚集在一起，它们一定是能区分的，这就意味着它们一定有不同的能量和相对于作用力中心的侧向运动。为什么原子里的电子一定占据分层的能级，又为什么各种元素从而占据着周期表里不同的位置，正是这个原因。化学、生物学——确实还有我们本身——再没有其他的本质。所有这一切都是由于在三维空间定向的特殊性质。

物质在其自身质量下坍缩最终一定要达到某一密度，在这一密度下，对于共存的大量相同的费米子的限制开始起作用。当凝聚的质量失去其热量，而电子开始占据相邻状态时，这种情况就发生了。但是它们的能量不可能很高，以致大自然是从低能的可区分的一个个空位上去摆放它们。一个收缩的气体球具有有限的能量，如果密度无限地增大，一些电子一定会最终填满空位，直到不再有空位接受它们。这时，爆缩就停止了。

几百万这类天体（称为白矮星）点缀在各个星系内。如果太阳坍缩成这种构形，它将不会比地球大。太阳由于受到电子的支撑而免于灾难性的
51 坍缩，实际上它在这类恒星中几乎是最大的了。

但是，如果周围有太多的物质，使得天体不断地往自己致密的核心上堆积这些物质，那么将发生什么事情呢？完全没有证据表明量子力学能够破除。事实上，量子力学是科学中最有活力的理论，也许是因为与试图解释自然界的其他学科比较，它更着重于描述而不是理论。新的情况是，如果在太阳这类天体上加上 0.5~2 太阳质量的物质，电子和质子将被挤压在一起，聚合成一类新的称为中子的费米子，恒星失去了自由电子的支撑，恢复爆缩。当可区分的要求再次出现的时候——显然是最后一次了——由此引起的坍缩还会再次受阻，不过这次是中子不能全部占据同一状态。天文学家称这类天体为中子星。它的致密程度极高，相当于把太阳的全部物质压缩到大小如同芝加哥的球体之内，它的密度完全超乎常规，一汤匙的中子星物质与全体人类的体重相当。

在下一节我们将会看到，若由广义相对论来确定大小的限度，中子星的大小处于一个不确定的范围之内。例如，太阳如果成为一个黑洞，它的

半径约为3千米，但如果成为一颗中子星，其半径不大于10~20千米。所以，当物质不断地堆积，而引力又毫不延迟地继续着导致完全坍缩的进程，接着将发生什么事呢？毕竟，这类天体的质量与太阳是可比拟的，但是在星系核内的特大质量天体和类星体却要重几百万至几十亿倍。

处于这种极端条件下的物质，其物理机制在这一点上多少还是朦胧不清，使得天体物理学家手足无措。天体物理学家已经知道随着中子星质量的增大，它的大小会缩小，但是发生这种情形的变化率还未确定。在中子星的质量增大到大约3个或4个太阳质量时，它的半径可能小到只有7千米或8千米，它的表面引力已足够强大，以致光线要拼死挣扎力图逃逸。⁵²确实，对于一个3个太阳质量的天体，其半径已低于视界，我们就把这种“新”天体称为黑洞。

关于超过这一状态的物质的性状，我们的所有陈述纯粹属于推测，因为对于穿越“无返回膜”后发生的一切，我们绝对没有丝毫信息。如果量子的机制原封不动地起作用，中子将永远不会一起滑落到一个奇点上去，虽然它们可能分解成为由它们的组元——夸克组成的等离子体。但是那里的费米子太多了，由此可以推断，还会受到不相容原理³的支配，它是在密近范围内由不可区分性引起的。由于某种原因，在这种环境下可能发生费米子转化为玻色子的情况，只是我们还不知道[关于这一主题的某些讨论，直到今天还很有价值，可在下列开创性的论文中看到：Chandrasekhar (1931)，Landau (1932)，Eddington (1935) 和 Oppenheimer and Snyder (1939)]。量子力学和经典广义相对论在这里严重地背道而驰，因为一方面，量子力学不允许粒子侵入彼此的空间，可是广义相对论看来赞同向奇点的逐步推进是不可避免的。然而，我们确切知道的是无论在何种情况，受压缩的物质会葬送在视界之内，而我们无法与它们进一步交流，除非我们采取不可逆转的冒险举动。

黑洞的时空

大约1个世纪以前，一位爱因斯坦的追随者以他惊人的洞察力为这一

理论的主要部分奠定了基础。1915年12月初，参加第一次世界大战的卡尔·史瓦西（Karl Schwarzschild, 1873~1916）正驻扎在俄国前线，当时他收到了爱因斯坦关于广义相对论的论文的复本。不幸，他不久之后染上疾病，并逝世于返回波茨坦的途中，在1914年战争爆发之前，他曾在波茨坦担任教授。十分令人瞩目的是，他能跻身于推导广义相对论场方程解的少数学者之列，他的解描述了球形质量周围时空的性状。史瓦西把他的论文寄给爱因斯坦，后者把它呈递给柏林科学院。史瓦西收到了下述答复：“我不曾想到能推导出这个问题的确切的解。在我看来，你对这个问题的分析解是极其辉煌的。”不过，他们两位都不能领会这是多么了不起的贡献，因为它包含了对一个球形、电中性、非旋转黑洞的外部度规（即对于测量距离和时间的数学表达）的完整描述。为了纪念这位开路先锋，今天把这种黑洞称为“史瓦西黑洞”，这位先锋战士在东欧刺骨的严寒中挣扎，率先发现了阐述黑洞的道路。

明白时空的结构，实际上等同于知道了一个事件相对于另一事件的距离和时间间隔。每一个事件——不论是一个粒子向引力源掉落的速度还是在电梯里的加速度——都能由此推导出来。大自然向我们显示，光具有可达到的最高速度（即使引力的作用也不能传播得更快），而且由于光速在任何时候、任何地方总保持不变，那么我们在不同的参考架之间测量到的距离和时间则不相同。我们还不了解为什么会是这样，但是物理学家有能力导出说明这些测量的度规。

至于狭义相对论——它并不包含任何加速度，因此只适合于描绘没有引力的时空——在它那里，度规很容易写出和理解。既然光每秒前进300000千米，那么它经过的距离就是300000千米乘以这一给定时间间隔内流逝的秒数。所以不论是谁在观测，对于一个光脉冲测得的距离将是

54 $d=ct$ ，其中 c 是光速， t 是以秒为单位的时间间隔。由于光脉冲既能向我们射来，又能离我们而去——两种情况 d 的符号相反——因此更加方便和习用的是写为 $d^2=(ct)^2$ ，这就是说，光线穿越的距离的平方是速度的平方乘以消逝的时间的平方。这个关系式就是狭义相对论中的度规，它的意义是，不论谁作测量，观测者总能得到光的 d^2 的值，它恒由 c^2 乘以 t^2 给出。

然而在有引力的情况下，设有两个参考架，一个在另一个之前且运动更快，那么时间流逝过程本身会在它们之间产生变换。史瓦西从理论上证明，我们不再有简单的表达式 $d^2=(ct)^2$ ，因为对于距离 d 的最终测量是在与原先的测量不同的参考架内实施的。他认识到为了保持光速不变必须做一修正，并得出结论，这个修正是与当地的引力加速度值有关的因子。

史瓦西对于在一个静态、球对称引力源情况下光传播的度规求得了 $d^2/f=(ct)^2$ ，其中 f 定义为因子 $(1-2GM/c^2r)$ ， M 是中心天体质量， r 是距离中心的半径， G 是标志引力强度的常数。证明这个度规确实满足爱因斯坦方程需要一定的数学技巧，然而，明白了它的物理意义之后，这就不难了。[请注意，只要光沿半径运动，这个度规的形式总是正确的，这就是说这里的 d 只是被看成 r 变化的一种度量。如果光线沿任意方向运动，由出现在左端的加速度产生的修正要取为 1。然而，与时间间隔有关的修正（出现在右端）也总会出现。] 我们能够一目了然地看到，由于引力加速度产生的效应以很简单的方式进入，牛顿在推导引力定律时所做的具有历史意义的努力，在因子 f 内完全得到承认（尽管是以修正的形式）。事实上， $2GM/c^2r$ 项是牛顿的（从质量为 M 的天体的）逃逸速度与光速的比值取平方。

由史瓦西度规可见，在远离中心天体处，那里半径很大，因子 f 趋近于 1，于是转化为狭义相对论的度规 $d^2=(ct)^2$ 。之所以出现这种趋势，是因为引力随半径的平方递减，所以如果距离足够大，任何天体的影响都显得微弱了。但是，如果我们考察光线向另一方向，即向引力源行进，将发现随着逃逸速度向光速趋近，出现了非同寻常的事情。因子 f 趋近于零，而半径 $r=2GM/c^2$ ，这时的半径称为史瓦西半径。

到达或趋近这个界限的粒子永远不能返回到我们的世界，因为它们必须跑得比光更快才能摆脱中心天体的魔爪。这样一来，具有史瓦西半径的球面就把外部世界与不可进入的内部区域分割开来。有人发现自己正好在这个表面的外边，还来得及向远方逃逸，而不必达到光速。但是一旦进入这个表面，连光线也不能逃逸，由此可见这个内部区域是黑色的。产生具有史瓦西半径的时空并能让物质（或光线）掉落入内的物体称为黑洞，而

它的“表面”称为视界。

回头思考上一节的内容，我们现在能够理解为什么中子星是这样一种让人迷惑的天体。这些天体把相当于太阳的质量压缩在 10 千米大小的体积之内，自恃有大约 3 千米的史瓦西半径 $2GM/c^2$ ，向着万劫不复的一点跃跃欲试，准备着接受任何新的物质补充而引起剧变，导致整个系统坠入深渊。天文学家认为，当有相当于两个太阳的额外物质掉落到中子星上时，这一幕就会发生。这时史瓦西半径会增大为 9 千米，超过了新恒星高度压缩的预期大小。在视界形成之后，它与这个暗黑天体的增大几乎无关。由于史瓦西半径与 $2GM/c^2$ 成比例，所以只在当有更多的物质灌注入内时，视界才会增大，当有 100 万个太阳汇聚到这个无底洞里去之后，它最终能达到太阳系的大小。

没有先前探索的其他结果——存在额外的维数或如同粒子那样的不可区分性——能够阻止这件事情发生，虽然在质量等同太阳的天体在压缩成巴掌大小之前，为什么与物质坍缩有关的所有“物理机制”会发生以及视界会最终形成是一种永久的神秘。毕竟，在这等大小的天体与那些雄踞于可观测宇宙边缘、具有 10 亿太阳威力的天体之间，质量上的差距是巨大的。但是我们现在至少已认识为什么这种差距会存在——这是等级问题的另一种表现形式。

旋转的黑洞

要不是对广义相对论的方程又有了突破性的新解，史瓦西的辉煌成就本来会保持它的决定性意义直至今日，但这个新解终于出来与它分庭抗礼。在关于引力场内的时空首次解读之后的 50 年，罗伊·克尔热切地追踪旋转黑洞周围的时空，一个更加确切的解终于瓜熟蒂落。

宇宙中的大部分天体或多或少都在自转，因为事实上不可能把都在作径向运动的物质集结在一起。自然界中，侧向运动极其普遍，常常在各种质量集中过程中成为起主导作用的力（参看第 2 章）。若要形成非旋转恒星，正在凝聚的气体熔炉中的所有侧向运动必须在一定程度上消除掉。否

则，受压缩的天体会继续保持侧向运动，正如冰上芭蕾运动员在收拢双臂时身体加速旋转。

当一个较大的天体发生坍缩、其中心变得极其致密时，就能够产生急速自转的个体。要是我们的太阳在老年时成了一颗白矮星，它的尺度缩小到 1/100，当前 26 天的自转周期将缩短到只有 4 分钟。如果它进一步缩小到现在的 1/1000——成为一颗中子星——它将每秒旋转几百次。

57

黑洞是在旋转中诞生的。在它们诞生后，随着获取额外的物质而长大，并通过视界吸收所有侧向运动。天文学家认为，靠近黑洞的有去无回的表面的每件事物最终都具有接近光速的侧向运动。即使质量达 1 亿太阳、视界扩展到 1.5 亿千米以上的大黑洞，它的旋转周期也只有 1 小时 45 分钟！

史瓦西度规不能解释这一情况，因为旋转黑洞以一种出乎意料和有争议的方式冲击着周围的时空。由于同一理由， $d^2/f = (ct)^2 f$ 的关系也不再成立，正如一位母亲望着她在旋转木马上跳跃的儿子，不再能通过简单地计数他的步数来测量他经过的距离。虽然她还能够数着她手表上秒针的“嘀嗒”声来计量经历的时间 t ，但是现在她儿子经过的距离 d 取决于旋转木马的侧向运动，它载着他还在上下腾跃。

罗伊·克尔关于广义相对论方程的解表明，时空本身犹如旋涡中的水，环绕着黑洞在旋转，它的速度与后者的自转桴鼓相应，不过随着与中心的距离增大而递减。物理学家称之为“参考架拖曳”效应，意味着时空本身及其包含的一切都被迫与引力源一起旋转，即使这个参考架中的物体相对于空间本身恒定不动。这是一个十分奇特的概念，而且难以从表面意义上接受它，因为它似乎表明，即使我们能够以某种方式把一个侧向速度为零的粒子放到旋转黑洞附近，它所进入的时空正在旋转，意味着这个粒子在远方观测者的视野里也将作侧向运动。

时空旋转的现象确实十分有趣，它可能是特大质量黑洞具有若干特殊性质的原因。显然，这种旋转效应实际上能使物质更容易抵抗向内拉的引力，因为它在屈从于不可避免的陷落之前，会以更多的侧向运动与之周旋。此外，旋转轴实际上为类星体和活动星系核之外的万物提供了借以参

58

照的恒定方向。如果我们回头看看图 1-2 和图 1-8，我们深信从每个天体中心喷向远方的等离子体流是一种非常稳定、长寿命的活动。对于特大质量黑洞来说，长时期里最稳定的动力学特征是它的自转轴，而这些壮丽的超细的羽霓则是大自然为我们指示它的自转方向的手法。

最近发射的几个威力强大的 X 射线卫星正为天文学家们提供有力证据，表明黑洞存在自转。其中一个载有空基多镜面 X 射线望远镜——因此早先给它起名为 XMM 设备——于 1999 年 12 月由欧洲空间局（ESA）和美国宇航局在法属圭亚那发射升空。XMM-牛顿卫星（这是它现在的名称）携带着 3 台先进的 X 射线仪器，其集光能力足以探测几百万个天体，比以前所有的 X 射线仪器的灵敏度要高得多。作为对研究人员的丰厚回报，它在 MCG-6-30-15 星系的中心发现了一个快速自转的黑洞，其质量达 1 亿太阳，距离为 1.3 亿光年。

从地球看去，MCG-6-30-15 星系并不显得特别反常——它甚至没有被冠以以资识别的名称，如银河系、仙女星系之类。它是一个透镜状星系，恒星聚集成透镜的形状，但是没有悦目的、发光的旋臂，如同我们银河系一样。但是 XMM-牛顿卫星看到了某些特殊的东西，它聚焦于这个星系的核心，检测到由热的发光气体产生的 X 射线正在挤压着进入黑洞 [这项工作是由一个国际天文学家团队用欧洲空间局和美国宇航局的 XMM-牛顿卫星实施的（参看 Wilms *et al.*, 2001）]。

- 59 X 射线的能量比可见光高得多，当粒子碰撞或者被加热到极高温度时，常会产生 X 射线。例如，牙科医生能用 X 射线为你的牙齿拍摄透视照片，这部机器以一股加速的粒子射向金属靶子，产生 X 射线。由此产生的剧烈碰撞使得束缚在原子内的电子从一个能级向另一个能级跃迁，如弹球游戏般落入不同能量级别，倾泻般辐射出去。铁靶上受激发的——尽管是束缚着的——电子有时会在这样的跃迁中精确地失去 6400 电子伏特的能量。在环绕于黑洞周围旋转的气体中也会发生十分类似的事情，只不过现在的弹球是高能的光子，它们撞击在自由浮游的铁原子上。结果是 X 射线精确地再辐射相同的一份 6400 电子伏特的能量，并且很容易被 XMM-牛顿卫星检测到。

但是天文学家没有看到正好具有 6400 电子伏特能量的这些光子，因为在 MCG-6-30-15 星系里的铁原子在运动。实际上这更有利，因为 X 射线经受了多普勒漂移，就像从超速汽车上反射回来的雷达射束。如果汽车朝向警察开来，返回到探测器的雷达波频率加大；如果它在退行，则频率减小。从 MCG-6-30-15 星系发出并到达地球的辐射，在吸积盘（参看第 2 章）转向我们的那一端向频谱的蓝端（也就是向高能端）移动，并得到增强；而在转离我们的那一端产生红移，并趋向较低的能量。

当前，来自 MCG-6-30-15 星系并到达我们这里的信号是在地球上的白垩纪时发出的，大约在 1.3 亿年之前。2000 年 6 月，这些光线进入了 XMM-牛顿卫星一端打开的舱盖，掠过高度抛光的镀金镜面，并被聚焦到飞船另一端、距离 25 英尺（约 7.6 米）处的硅片上。研究人员解读这些 X 射线光子携带的十分惊人的信息后，竟然难以相信他们早期分析的结果。

他们发现，这些铁原子发出的 X 射线的光芒实在太过强烈，不能单单用引力的压缩来解释。再则，如果仅仅根据史瓦西度规来计算，X 射线光子的多普勒漂移的程度竟要溯源到十分接近黑洞的中心。只有引入旋转时空产生的侧向运动才能说明为什么铁原子如此接近视界而没有遭受灾难性的拖曳。显然，MCG-6-30-15 星系中的黑洞一定在迅疾地旋转。而且，如果这些原子辐射的亮度异常明亮，一定有引力以外的其他原因把它们加热。

几十年以来，理论家们困惑于是否可能提取涡动时空的旋转能，并把它们化为宇宙中最壮观的景象——类星体产生的巨大光芒（参看图 1-2）和从某些活动星系发射的接近光速的辐射气体的喷流。这些现象的基本原理其实早在 1831 年已由英国化学家和物理学家米切尔·法拉第（Michael Faraday, 1791~1867）发现了。法拉第具有广泛的兴趣，包括气体的凝聚、冶金学、光学错觉、声学 and 能量守恒。他的许多发现被认为有开创性的意义：静电感应（1838 年）、电与磁的关系（1838 年）和电与引力的关系（1851 年）、水力发电（1843 年）以及空气的磁性（1851 年）。

1831 年，法拉第在其著名的实验中发现了感生电流，实验中电流计显示在绕匝于带电流的金属环周围的线圈里存在电流。这正是后来制造变

压器的基本原理。这一年之后，他从反方向来研究电动机，假设磁能运动产生电流，这样他就创制了第一部发电机。

环绕 MCG-6-30-15 星系中的黑洞周围的吸积盘包含着荷电粒子，它们在运动中产生了磁场。1977 年剑桥大学的罗杰·勃兰德福特（Roger Blandford）和罗曼·兹那耶克（Roman Znajek）提出，下落的粒子连同它们的磁力线一起陷入黑洞，所以这些磁力线从视界伸出，就像豪猪身上的刺。但是，这正像法拉第在其实验中使用的装备，磁场通过一个电导体运动，只不过规模宏大得多。自转着的黑洞带动周围的时空旋转，并使磁场环绕它运动，产生了电压（参看图 3-2）。然而，不同于法拉第的桌面实验的是这里的电压惊人地巨大——在黑洞的两极与赤道之间的电势差可以达到 10 万亿亿伏特。

乍看上去这似乎是一条悖论，因为看起来正从黑洞提取能量，但被这个宇宙发电机分流的能源实际上本来就没有被吞噬，相反，它是储藏在视界之外时空的旋涡里。磁力线的作用类似于绕匝在这个旋转区域的巨大电路上的导线，使得黑洞本身成了一个发电机。可以认为，黑洞就像一个巨大的飞轮，当磁力线把带电粒子猛烈地抛向远方时，它的转速持续而又缓慢地降下来。这就好比一些橡皮筋，它们缠绕起来，然后突然恢复原状，周而复始，反反复复，产生了粒子和能量的脉冲式的抛射，就像焰火表演。

细长的高能气体流可能参与了这种焰火表演，它们从某些星系核内以光速的 99% 的速度冲决出来，直射入星系际空间达几百万光年，然后发散成巨大而明亮的双瓣（参看图 1-8）。释放的能量中的其余部分很可能加热黑洞周围的气体，产生异乎寻常地明亮的铁 X 射线辐射，这正是 XMM-牛顿卫星从 MCG-6-30-15 星系探测到的。

这里有一件奇怪的事情：为什么 MCG-6-30-15 星系本身没有可察觉的喷流？就这个活动星系而言，它是比较平静的。然而，确实有一个非同一般的明亮的、发射 X 射线的铁环绕在星系的核心周围。正如我们所见，这股光线的最可能来源是由旋转黑洞提供能量的法拉第电磁发电机。很可能存在我们目前尚未认识到的“阀门”，它在调节着将多少份额的能量分

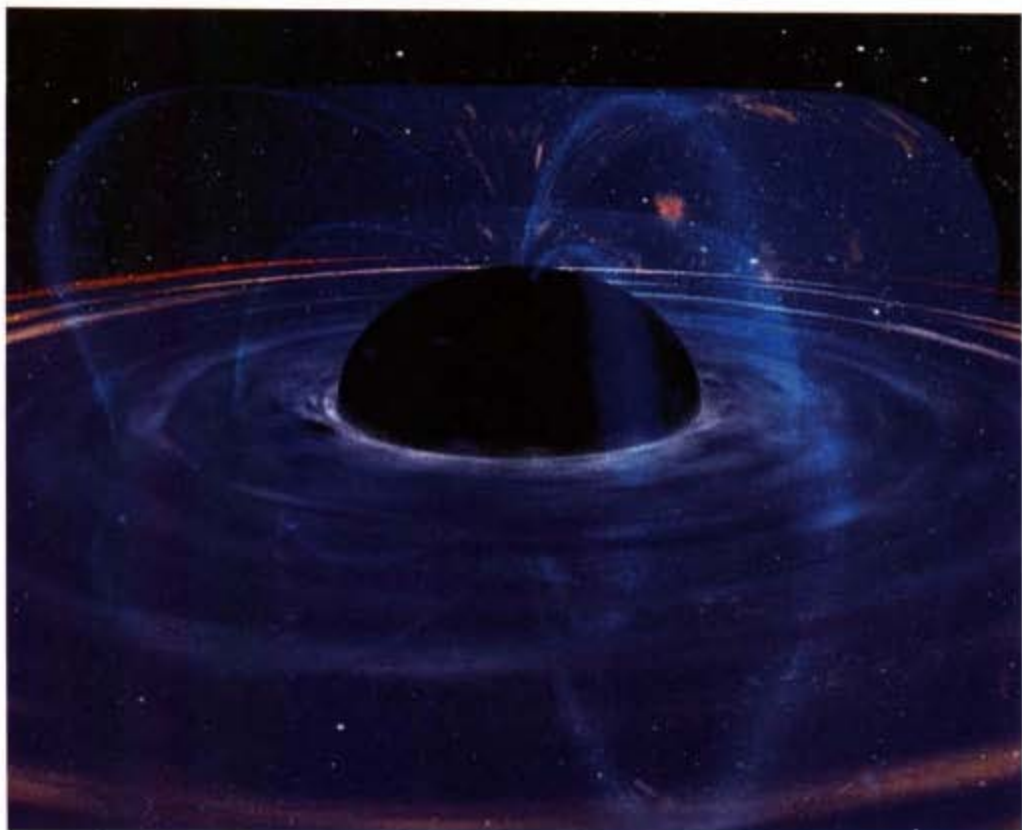
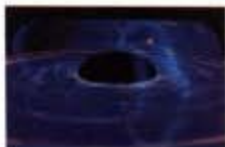


图 3-2 位于 MCG-6-30-15 星系的特大质量黑洞离地球 1.3 亿光年，质量约 1 亿太阳质量。最近 XMM-牛顿卫星的观测表明在十分接近黑洞视界的区域内正在产生可探测到的光线，那里的时空与中心天体的自转同步旋转。这种受迫运动与磁场（图中以纤细的、淡蓝色的丝絮表示）纠缠在一起，后者冻结在黑洞及其周围的吸积盘上（承蒙艺术家 Dann Berry 和数字天空工作室惠赐图像）

配给射出的高能粒子，又将多少份额的能量用于绕转气体的局部加热。天体物理学家正在探索这一妙趣横生的问题，未来几年将能听到更多的消息，对此我们深信不疑。

4 特大质量黑洞的形成

63 虽然哈勃空间望远镜拍摄的遥远星系的某些照片显示的特征是能够触发类星体活动的破坏性碰撞，但是另一些则显示正常的、未受扰动的恒星集群，在宇宙的霹雳之间默默无闻。这是一个征兆，表明有各种各样的机制——有些十分隐蔽——可以点燃类星体。然而，不论形成过程如何，特大质量天体看来对其寄主没有施加明显的毁损，所以它们的大规模的物质和辐射的输出可能是短期的现象。[正如我们将在第5章所见，特大质量黑洞有时以极高的速率吞噬物质，以致由此产生的高压把还来不及吸进视界的部分气体喷射出去。]此外，这项观测还不足以引导天文学家确定关于类星体诞生和成长的自洽和唯一的模式。

若干年来，关注特大质量黑洞性质的天体物理学家们提出了宇宙版的“先有鸡还是先有蛋”的问题：封闭时空中的巨大坑穴和充满绚丽星星和光辉气体的活跃的星系，究竟哪个先出现？

最近令人瞩目的发现看来已经多方面地回答了这个问题，在此之前已有证据有利于黑洞出现在前。观测表明，类星体的数量达到峰值是在100亿年前，即在宇宙存在的早期，这应是确凿无疑的证据。另一方面，来自星系的光线要晚得多——在其之后的2亿~40亿年。可惜，对类星体和对星系的测量都含有不确定性，没有人能肯定我们正在测量来自类星体和星
64 系的全部光线，所以这个论据并非最有说服力的。但是，天文学家确实在他们能见的最远处看到了类星体，而且它们中距离最远的往往又是宇宙中



能量最大的天体，所以至少有一些特大质量黑洞一定存在于宇宙的开端。

图 1-5 就是星系的首选例子，真是再好不过了，它展示了恒星和气体集合的巨大系统由更小的结构结合而成——在其附近还看不到类星体。可能并非每次碰撞都能馈赠黑洞，更可能是，至少有一些星系是形成在前。

关于宇宙中特大质量黑洞的产生，现在物理学家把他们的注意力集中在 3 个突出的方面。在每种情况下，都是当物质落进时空扭曲的无底洞里时，黑洞长大起来，不论是由于大质量气体云的收缩，还是通过较小黑洞碰撞和并合的代谢作用。

最初的种子

宇宙中的一切结构都可溯源到大爆炸之后不久的鸿蒙初辟。从那时遗留下来的能被科学家用来解开宇宙早期之谜的“化石”少之又少，其中最重要的一种是宇宙微波背景辐射——这是从不可估测的高温和混沌的创生中遗留下来的余辉。根据大爆炸学说，大部分氢分解为游离的质子和自由电子，形成了耦合着电场和磁场的电荷和电流的热海洋。所有的粒子和辐射相互平衡，频繁碰撞并自由地交换能量；物质和辐射的行为就像一股水流。

随之而来的快速膨胀降低了物质的密度和温度，在大爆炸之后大约 1 个月，光线产生和湮灭的速率不再跟得上日益稀薄的等离子体。辐射和物质开始脱离相互平衡，把那个时代的条件永远镌刻在光子上，今天光子从空间的各个方向到达我们这里 [关于宇宙早期历史的极妙的报道，可参看专业性较强的 Linde (1990)]。正是宇宙微波背景辐射的存在排斥了稳恒态宇宙模型，在后者看来，宇宙中的变化不在时间的进程中，要说宇宙中有任何一步变化，要对应于任何其他变化。这一模型与背景辐射相抵牾，因为今天的宇宙并不包含为产生它所要求的这类环境。

到处弥漫的微波背景辐射是于 1965 年在偶然的机遇中被发现的，但是它的故事开始于多年以前。1934 年，就在哈勃发现宇宙膨胀之后不久，里查德·托尔曼 (Richard Tolman, 1881~1948) 还是加州理工学院的化学

教授，不过他的兴趣已经从物理化学转移到了宇宙学。在他学术生涯的早期，他已经证明了电子是金属内的荷电粒子，甚至还测定了它的质量，但是他在1934年出版的一本大师级的著作——《相对论、热力学和宇宙学》——使他后来声名鹊起，正是这本著作引导他的许多学生进入相对论的离奇世界。这本巨著（里查德·托尔曼的这部著作已由道维尔出版社再版，在对宇宙学的历史感兴趣的人之间，再次拥有了一个广大的读者群）的最后一个段落摘引如下，因为它不仅反映了他对科学和哲学的研究，也许还是对宇宙学的基本内容最好的概括：

研究宇宙学问题的恰当态度是必须怀有下述情感，这就是尊崇这些问题的重要性，敬畏它们的广泛性，并为人类试图解决它们的勇气而鼓舞。然而，它们必须以深入的、批判性的和不带偏见的科学方法去处理。

托尔曼说明了随着宇宙的演化，它的温度下降，它的光子将随着宇宙膨胀向长波方向红移。关于辐射温度的首次可靠的预言是若干年后由乔治·伽莫夫（George Gamov）、拉尔夫·阿尔弗（Ralph Alpher）和罗伯特·赫曼（Robert Herman）做出的（他们几位就这一主题发表了几篇论文，有些是合作的，有些是分开的。两篇关键的论文都发表在1948年的《自然》杂志上，一篇由伽莫夫撰写，另一篇由阿尔弗和赫曼撰写），他们认为化学元素可能在原始火球内的热核反应中合成，并研究了这一思想。他们估计当前的辐射温度已下降得很低，低至绝对零度以上5度。

1930~1965年，人们正在寻求哈勃宇宙学的根源，历史学家可以理直气壮地把这一发展过程作为一些移花接木和机缘凑巧的发现，只是由于当时顺应了研究方向和事后认识到其重要性，而终于被科学界接受的精彩例证。原来，早在伽莫夫、阿尔弗和赫曼开始缀补他们关于原始火球里的热核反应理论之前，宇宙微波背景辐射实际上已经被发现——然而没有被认识到。它于1965年被偶然再度发现，还是没有引起重视，稍晚我们将再回到这一主题。



1940年，正当第二次世界大战的狂飙席卷欧洲的时候，安德烈·麦克凯勒 (Andrew McKellar)，一位30岁的天文学家，正在加拿大英属哥伦比亚的多米尼翁天体物理天文台工作，他把望远镜指向了明亮的蛇夫座 ζ 这颗恒星。之前比利时的保尔·斯温斯 (Pol Swings) 和列昂·罗森费尔德 (Léon Rosenfeld) 曾经假设星际介质产生的辐射中某些未确定的特征可能是简单的双原子分子引起的，他试图证实这个假设。有人会想，这些质点可能是细微的哑铃——中间以键连接着两边的双瓣。这些分子吸收光线并与其他物质碰撞，既能忽前忽后地振动，又能绕着自转轴转动，在每种情况下都发出显示运动的辐射特征。

麦克凯勒不仅证实了这类受激分子存在于星际介质之中，而且在此过程中还做出了他对科学的最大贡献——发明了实地测量空间温度的热量计。每个双原子分子的旋转能量相应于它从环境中吸收的辐射热——温度越高，它自转越快。麦克凯勒比较了以各种能量自转的微哑铃的数目，求出星际介质中气体的“自转”温度为2.3开[考虑到现在我们得到的最佳值是2.73开，这个结果堪称非常重大的成就。参看 McKellar (1941)]。麦克凯勒在1941年于仓促中写了几篇论文后，再也没有在这个课题上写过什么，他于1960年5月逝世。很可惜他从来没有认识到自己工作的意义，至少在后来的5年里没有出现意义相似的工作。

太空商业化推动了实验宇宙学的发展——它促进了科学家取得实验宇宙学的一系列进展，而这一系列进展却始于一个与实验宇宙学不相关的发现。阿尔诺·彭齐亚斯 (Arno Penzias) 和罗伯特·威尔逊 (Robert Wilson) 当时受雇于新泽西州克劳福德的贝尔实验室，他们使用灵敏的角状无线电测量仪与早期的“远星”通信卫星联系。1963年，贝尔实验室最终决定放弃这项商业活动，让彭齐亚斯和威尔逊——两位训练有素的射电天文学家——整修这台无线电测量仪，用于更基础的科学研究。此后不久，他们在研究仙后座A的超新星遗迹的射电辐射时，探测到一种均匀的噪声源，起初看来是由仪器本身产生的。他们花了许多个月的时间反复检测仪器和电子设备，还从角状天线内清除了一个鸟巢，终于相信信号确实来自于天空。

当时普林斯顿大学有个研究组正准备试验他们的接收机，以便研究宇宙辐射。数月之后，当普林斯顿大学的研究人员肯定了彭齐亚斯和威尔逊的发现之后，他俩的失落心情才得到缓解，这令人忍俊不禁。彭齐亚斯和
68 威尔逊以一篇题目平淡无奇的、很简短的论文《4080 Mc/s 超天线温度的测量》[参看 Penzias and Wilson (1965)；在同一期杂志上还发表了同一主题的论文 Dicke et al. (1965)] 发表了他们的成果。普林斯顿大学的研究组完美地完成了他们的历史性测量，发表了一篇同一主题的论文，阐述测量结果的宇宙学意义。1978 年，阿尔诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊因他们的发现而荣获诺贝尔物理学奖，这是在最短时间内就获得如此殊荣的发现之一。

宇宙学终于进入科学的主流，现在宇宙微波背景辐射已能从有待发现的化石宝藏中探测到。天文学家希望最终能够了解宇宙为什么会有结构，星系为什么形成，特大质量黑洞在什么条件下成长。理论家很快就认识到，宇宙辐射温度的涨落可能反映了密度的初始扰动，很可能因此促进了后来看到的老年宇宙中的质量凝聚。当初，在这种想法的鼓动下，对这种扰动的估计值—— $1/100$ ——被过分夸大了，但现在看来也不值得惊奇。仅仅过了几年，经过改进的仪器的灵敏度便达到了这一水平，而且背景辐射在大范围内看来还是均匀的。

在随后的 $1/4$ 个世纪里，出现了相当奇怪的一种努力，试图抑制温度的各向异性，理论家们为此不顾实测所得可信度日益提升着的上限，不断地往下修改估计值。他们言之凿凿地宣称，天文学家看到的就是一片均匀的辐射场。而当这一限度达到 $1/1000$ 时，引起了很大轰动。理论家们说，由于涨落这么小，与普通物质——即构成我们的材料——有关的密度扰动将没有足够的时间自由地演化成我们今天所见的非线性结构。只有引力起
69 主导作用的暗物质成分才能导致质量的强烈凝聚形成星系和特大质量黑洞。此后认识到，不论宇宙微波背景辐射与普通物质如何相互作用，暗物质成分在宇宙中没有留下任何印记。因此，不发光的物质能够以任何方式无规则地凝聚（有时称为“成团”），这个过程可以追溯到大爆炸，我们对此尚一无所知。



天体物理学家知道，至少有 3 个原因导致普通的密度波动与观测到的宇宙微波背景辐射的强度（或温度）之间会产生局部的差异。首先是产生辐射的等离子体的固有温度的改变。气体受到压缩，就被加热，温度的局部改变等于密度的局部扰动。其次，向着我们或远离我们运动的气团会使得它们产生的微波辐射作多普勒位移，正如 MCG-6-30-15 星系内的盘（参看第 3 章的“旋转的黑洞”部分）使得在其视界附近产生的 X 射线作明显的多普勒位移。其三，早期宇宙中的物质成团会造成引力的局部变化，所以当宇宙辐射通过这些峰或谷的时候，会在沿途遭受剧烈的增强或衰减。（顺便说明，暗物质涨落的情形也一样，但是效应不如其他的大。）

所以，在天文学家能够切实看到天空中的这些远古产生的局部差异之前，他们应该拥有多么高的灵敏度呢？1992 年，宇宙背景探测（COBE）卫星终于探测到人们翘首企盼的涨落，为迅速增大的宇宙学家群体带来了些许宽慰 [参看 Smoot and Davison (1993)]。图 4-1 所示的全天空图用不同颜色表示，表示较热的红色区域比表示较冷的蓝色区域的温度约高 0.0002 开。不去理会图中红色的赤道区域，它主要代表我们银河系产生的微波辐射，我们目击了这种涨落，它明显地反映了大爆炸后不久的早期宇宙中物质密度的变化。 70

要得到这张像，就必须非常仔细地消除与卫星在宇宙空间运动有关的其他效应。卫星环绕地球、地球环绕太阳、太阳环绕银河系、银河系在宇宙中穿行，所有这些速度都会使得宇宙微波背景辐射在运动方向比相反的方向看起来更强（即更热）——大约相差 1/1000。这个由多普勒位移引起的效应的大小，给了天文学家一个去测定本星系群相对于空间基本结构的速度的机会。我们相对于邻近空间的宇宙整体膨胀明显地以每秒 600 千米的速度运动。

宇宙背景探测卫星装备的仪器不仅能够测量前后方向的不对称性，而且能揭示天空中不同角度的微小涨落，这些张角相应于约 10 亿光年的距离。这比天文学家看到的宇宙中的最大物质结构更大，但是无论如何他们能由此断定早期宇宙并非完全均匀。我们在图 4-1 中看到的颜色斑块代表不超过十万分之一的温度涨落——几乎不大于测量的精度。然而，角度上

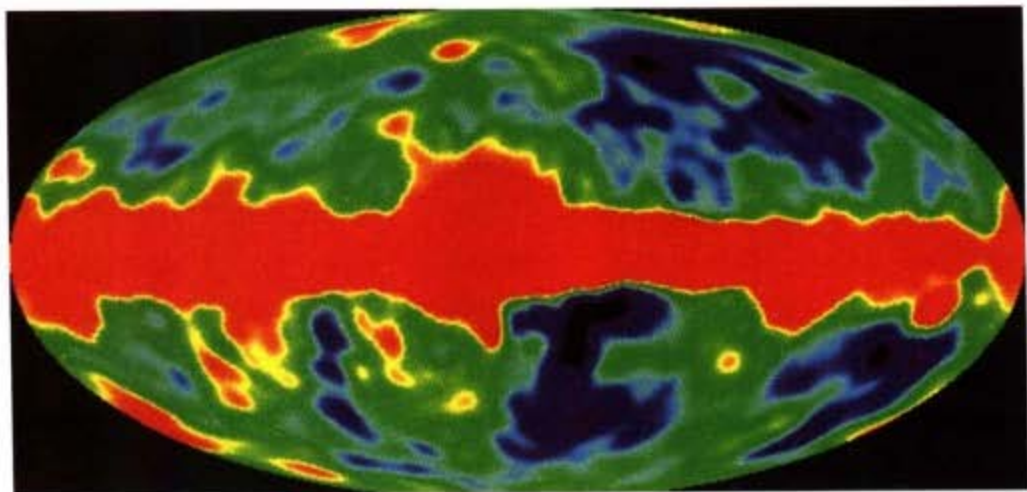


图 4-1 这幅图表示宇宙微波背景辐射的细微变化，以百万分之一的精度水平显示波动的所在。银河系的中心位于图的中央，全面覆盖整个天空，银纬从 90° 至 -90° （从上到下），银经从 -180° 至 180° （从右到左）。对这一辐射的最早的探测是 30 多年前进行的，表明它是几乎均匀的。可是，随着仪器的改进，所能达到的分辨率也越来越高。1992 年，宇宙背景探测（COBE）卫星以相当高的分辨率探测天空，使得天文学家有条件制作这幅绚丽的图像。在这幅图上，热的区域用红色表示，比用蓝色表示的冷的区域高 0.0002 开。来自银河系的辐射在本图的赤道带上占优势，但在其他方向实际上为零。离开赤道带，来自可观测宇宙边缘的起伏主导了“热”和“冷”的图像。人们认为这些宇宙微波温度的起伏可以追溯宇宙早期物质密度的起伏。它们镌刻着大爆炸后不久的印记，揭示了星系和宇宙大尺度结构的起源（承蒙 George F. Smoot 等和美国宇航局惠赐图像）

的变化在统计上显得不同于随机噪声，所以它们直接证实了对于完全的各向同性的偏离，理论宇宙学家曾经长期预期这种偏离是宇宙结构的种子。

在比这更小得多的规模上，宇宙微波背景辐射的不均匀性也会由大爆炸的“回声”产生。以音速运动的物质，在原子和电子结合形成氢和氦之前，有充分的时间在天空移动张角约 1° 的距离。[迄今为止，已经报告了自己的研究成果的主要研究组有 BOOMERanG（河外毫米波辐射和地磁气
71 球观测）实测小组、MAXIMA（国际毫米波各向异性实验成像陈列）气球



实测小组和移动各向异性望远镜 (MAT, 设置于智利塞罗·托科) 实测小组。这些发现发表于 Miller *et al.* (2000), de Bernardis *et al.* (2000) 和 Hanany *et al.* (2000)。] 由此产生的振荡在宇宙中回荡, 就像爆炸之后声波呼啸着穿透空气。由这一过程引起的温度变化称为“声学”涨落, 与声波从大爆炸之初到氢合成传播的距离有关的范围称为“声”视界。就在本书写作之际, 一些观测计划已经报告了以高分辨率测量宇宙微波背景辐射的初步结果, 这些结果符合早期宇宙模型。

顺便说明一个被人忽视的重要事实, 即天文学家在看到宇宙微波背景辐射涨落的时候, 曾经经历了令人难以置信的为难局面。它呈现如此高度的各向同性, 既代表了美学要求, 又表现出寻求最简单理论的困难。由于“光界”的约束, 这种均匀性和各向同性是难以解释的。请你仰望天空, 并设想能够感觉到微波辐射, 它们从宇宙两个相反方向到达你这里。光子以光速传播, 现在从产生它们的遥远的炽热等离子体到达地球。这样, 在天空一边的物质不可能有时间与另一边的相应物质交流——它们在彼此的光界之外。所以, 宇宙中所有的热等离子体怎么可能“知道”具有相同的温度和十万分之一的精度?

答案看来已由宇宙学的所谓暴涨模型给出, 该模型认为宇宙早期经历了指数式的增大 [这一理论的基础是 Starobinsky (1980) 和 Guth (1981) 72 等人提出的。也可参看 Linde (1990), 此文概括了作者于 1979~1981 年关于这一主题的工作]。这一模型的基本要点是存在一类粒子, 其性质会随温度改变。这个理论认为, 随着宇宙膨胀而温度下降, 储存在空间的真空里的能量密度不会改变, 因为这些实体的总量在不断增加。要是果真如此, 那么宇宙膨胀中的粒子激增效应就很可观, 导致大小的指数式增大——实质上就是暴涨。终于, 这些能量转化为物质的热运动, 宇宙再次变得极端炽热, 之后它的演化又由标准热宇宙模型描述, 不过加上重要的改进, 即关于热宇宙后续膨胀的初始条件是由更早发生的过程, 也就是暴涨时期所决定。宇宙学的暴涨模型还包含一些没有解决的问题, 现在已出现了几种针对存在问题的不同理论。然而, 宇宙微波背景辐射的几乎完美的各向同性, 表明整个可观测宇宙必定在因果上同辐射与物质解耦之前的

时期有联系，而且这是更早的暴涨时期的强力证据。

在大爆炸之后演化的最初 10 亿年里，宇宙一定是精彩纷呈，许多角色登台亮相，各擅胜场，并把影响留到今天我们所见的宇宙结构。由不均匀宇宙微波背景辐射反映的密度的涨落，如何最终凝聚成特大质量黑洞和星系，是科学家正在研究和热烈地争辩着的课题。这是科学中最重要的问题之一，涉及宇宙的基本内容，还可能涉及什么产生了大爆炸和此前有什么。正如我们马上就将看到的，现在有证据表明这两大类主要天体——特大质量黑洞和星系——具有同时代的历史，虽然我们已经指出至少前者中的某一些已早在其他事物之前存在。那么它们是怎样产生的呢？

伊利诺伊大学厄伯那原野分校的斯图亚特·夏皮罗 (Stuart Shapiro) 和他的合作者们提出了一种很有意思的想法 [涉及这一系列思想的有关文献包括 Zel'dovich and Podurets (1965), Shipito and Teukolsky (1992), 和 Balberg and Shapiro (2002)。也请参看 Umemura, Loeb, and Turner (1993) 和 Eisenstein and Loeb (1995)]，认为第一批特大质量天体仅仅是由暗物质形成的，并没有“普通”物质的参与，只是后来这些种子黑洞对后者施加影响。但是这种暗物质一定有些特殊，表现为它们的成分必定能够彼此交换热量。只要出现这种情况，它的一部分组元从凝聚物中蒸发出去，带走了大部分能量，剩余部分坍缩并产生了视界。净结果是这样一个团块的内部核心形成了黑洞，留下外部区域的扩展的晕与中心天体保持平衡。随着时间的流逝，普通物质在它的周围聚集，终于形成了恒星、行星和生命——这些正是促使我们去探究其意义的种种事物。

普通物质之所以会自身坍缩形成第一批特大质量黑洞，在于起初它们没有充分地聚集成团，图 4-1 中细微的涨落表明了这一点。也许这类物质形成了第一批恒星，然后产生更多的恒星，终于集成密集的星团，这些成员是碰撞中的定时炸弹。随着时间的流逝，这种集团的内部核心将会坍缩，原因在于它们的一些成员蒸发和随之而来的能量向扩展的晕散失，正如暗物质所为 [最早提出这一过程的看来是 Lynden-Bell and Wood (1968)。也请参看 Quinlan and Shapiro (1990) 以及 Haehnelt and Rees (1993)]。只有小黑洞开始凝聚的过程。人们估计，这样的—个天体一旦



形成，它的质量每过 4000 万年左右便翻一番，在宇宙年龄的期间内，即使是普通的黑洞也能增长成为具有 10 亿太阳质量的巨型天体，雄视于宇宙的前沿。 74

近来，哈勃空间望远镜揭示了宇宙早期一定出现过这类场景的令人惊奇又确凿可信的证据。球状星团包含着最古老的普通恒星。许多这类天体在 120 亿年前集结成团，成了最早的星系形成时代的真正的化石记录。哈勃空间望远镜观测到一个环绕仙女星系运动的球状星团 G1，探测了它的恒星动力学效应，识别出潜藏在其中心的一个拥有 2 万太阳质量的黑洞（参看图 4-2）。这个天体并没有增大成为巨型天体，是由于其周围其他物质匮乏。可是它的许多兄弟可能处于更有利的环境，能够在宇宙由于膨胀变得稀薄之前就已经急剧地增大 [van der Marel (1999) 报告了在球状星团 M15 的中心发现一个中等大小的黑洞。在球状星团 G1 核心内发现黑洞是于 2002 年由卡尔·格布哈特 (Karl Gebhardt) 及其合作者宣布的]。

无论是哪种情况，不再有证据表明只有这些机制才会导致产生遍布于整个宇宙的数以百万计的特大质量黑洞——确实，它们中的大多数不是孤立地形成的，而它们的寄主星系也不是。

星系的类型

星系在随时间变化。有些饱经岁月沧桑，另一些互相碰撞、并合，重新组合成更大更重的天体。如图 4-2 中的球状星团 G1 可以看成许多最早的恒星形成的熔炉中的一个。但是从原始的涨落（参看图 4-1）中凝聚出来的气体的侧向运动是不容易消失的，所以在幼年期的宇宙中，自转是许多星系形成后的确定性质。宇宙中包含这些挤满恒星群体的整体序列，构成了不同类型星团“按时间顺序”的排列，各种类型的差异随着特大质量黑洞数目的增加而增大，并与它们的寄主星系密切相关，这一点起初可能并没有被认识到。

由于星系是由发射可见光的物质团块构成，因此人们早在强力望远镜 75 和照相术问世之前就已经发现了它们，后来人们运用大型望远镜和照相术



图 4-2 在这张于 1994 年由哈勃空间望远镜拍摄的像的中心，驻留着称为 G1 的球状星团，它是一个巨大、明亮的光球，由至少 90 万颗古老的恒星组成。G1 环绕 17 万光年以外的仙女星系（M31）的中心旋转，仙女星系是离银河系最近的大旋涡星系，距离地球约 220 万光年。通过研究其中暗淡的氢燃烧成员星的亮度和颜色，天文学家能够得知这个结构大约在 120 亿年前形成，即在宇宙起源之后不久，因此这些恒星代表了星系形成的最早期的化石记录。G1 的总质量约为 1000 万太阳质量，它是已知的质量最大的球状星团之一。哈勃空间望远镜近来发现，在这个星团中央，从恒星的速度和空间分布来看，那里可能潜藏着一个中等质量的黑洞，它的质量约为 2 万太阳质量。这张彩色像是用可见光和红外光分别拍摄后合成的（承蒙哥伦比亚大学的 R. M. Rich、K. Mighell 和 J. D. Neill，卡耐基天文台的 W. Freedman 和美国宇航局惠赐照片）



对它们加以记录和分类。早在 18 世纪初期，天文学家们已经观测到某些云状的斑块和比较明亮的光源，并把它们编制成表。确实，法国的彗星猎手沙尔勒·梅西叶仔细地描述了这些天体，并把它们集中编入一本星表，现在称为《梅西叶星云星团表》，列出 100 多个现在已证实为星系、星团和气体星云的光源。仙女座中银河系的姐妹星系是这本表中的第 31 号天体，因此它的记号为 M31。此后，人们又编制了好几本综合的星云星团表，正如我们在本书的前面已经说明，只是到了 20 世纪 20 年代中期哈勃——和随后其他天文学家——才认识到这些光斑是我们的银河系之外的完全分离的恒星的集群。

事实上正是哈勃构建了星系的分类体系，把它们按类型归入一个井井有条的序列，现在称为哈勃序列¹。他以 600 个已被确认的亮天体为基础，对星系加以排列，首先是球形和椭球形的星系，然后是透镜状星系，直至非常扁平的旋涡星系。形状不规则的星系则形成独立的一类。

球形和椭球形的星系与其他 3 个主要类型的星系（透镜状星系、旋涡状星系和不规则星系）的区别在于它们平滑、对称的形态和没有明显的内部结构。它们具有明亮的中心，且亮度向边缘逐渐暗淡。它们不像我们的银河系，明显地展现有盘或面，也肯定没有旋涡结构。图 1-6 中的半人马座 A 有一种几近完美的椭圆结构，尽管它保留着一条暗黑的尘带，这可能是早期与一个较小的旋涡星系碰撞且并合后留下的。作为这些星系组元的恒星，看来是十分年老的，而且当前几乎没有新恒星在其中形成。天文学家解释说，这意味着椭圆星系类似于球状星团，蕴藏着宇宙初期诞生的第一批恒星。但是椭圆星系并不是以这种方式产生的，它们是较小的——76 可能是盘状的——星系的等级式碰撞和并合的副产品。正如我们不久将会看到的，在我们银河系中心核球中，许多恒星构成了椭球形的集群，非常类似于椭圆星系，只不过星数少得多而已。

透镜状星系和旋涡状星系（在哈勃序列里是两种独立的类型）包含一个恒星聚集的盘，通常在中心还有球形结构。旋涡星系的特征是具有从中心向相反的两边伸出的两条或多条旋臂，缠绕着星系盘并向着星系的外端逐渐稀薄。我们的银河系和仙女星系是旋涡星系中最令人瞩目的两个成

员。这类星系中其他非常美丽的例子有图 4-3 所示的草帽星系 (M104)，这张照片是由设置于智利帕拉那尔的甚大望远镜 ANTU 最近拍摄的。人们已经确定草帽星系的核心正在发射非常强烈的 X 射线流，同时在中心区域测量到了异常高的恒星速度，天文学家根据 X 射线轮廓推测有一个 10 亿太阳质量的黑洞盘踞在中心。这个星系也因它中心的硕大核球而引人注目，它主要是由成熟的恒星组成的，它的几乎侧面朝向我们的盘由恒星、气体和复杂的尘埃结构组成。有一种非常普遍的情况，即盘状星系中最年轻和最明亮的恒星（透镜状星系和旋涡状星系皆然）看来多出现于平面状区域，如果真有这样的面，那么主要是在旋臂里。与此相反，中心的彀盖在其恒星的组成和分布上类似于椭圆星系。

近几年来，天文学家发现了 1 万多个特殊星系，它们并不符合哈勃序列中的任何一种类型。它们中的许多显然正在经受碰撞（例如图 1-5 中的触须星系）或者是不久前灾难性事件的幸存者。有一些是紧密结合系统中的成员，彼此之间由明亮恒星和发光星际介质的桥梁连接。另一些小的——却是极其基本的——特殊类型的次系是具有异常活动的核的星系，在它们核内发生非常剧烈和高能的事件，且在很宽的范围内展现与之有关的现象。

77 天文学家作为检测当前现象的科学家，更着重于扮演宇宙化石收集者的角色，他们努力把历史片断串缀起来，以展示这些不同类型的星系是如何出现的。它们如何与特大质量黑洞相联系？它们是怎样形成的？而且类星体在星系演化中起了什么作用？10 年以前，把特大质量黑洞集中起来进行类似分类的尝试产生了一个相当简单的答案——它们是一类奇特的天体，是对于它们身外和谐的、以星系为主导的宇宙的一种例外。时代已经改变了，作为我们讨论近来所认识到的它们与星系共生和共同演化的开场白，在下文中我们将看到这类天体实际上是如何普遍。

特大质量黑洞的普查

本书中我们已经看到的每一个特大质量黑洞，无论从哪个方面来看都



图 4-3 这张壮丽的像是草帽星系 (M 104)，它于 2000 年 1 月 30 日由设于智利的帕拉那尔天文台的甚大望远镜 ANTU (在马普切语里的意思是“太阳”) 拍摄。这是在不同波段 3 次曝光的合成像。这是旋涡星系的例证，它包含大的明亮核心，又有十分明确的旋臂，我们在这里几乎是从它的边缘从侧面看向它。它也有异乎寻常地突出的核球，并有分布很广、成员众多的星团系统。它位于室女星座，距离地球约 5000 万光年。它与半人马座 A 星系 (见图 1-6) 相比较，后者接近于椭圆星系，盘的结构很不明显。据推测，早年草帽星系曾与一个较小的旋涡星系碰撞而并合，由此留下了暗黑的尘带 (承蒙卡普坦研究所的 Peter Barthel 等和欧洲南方天文台惠赐照片)

是特殊的，或者由于它是人们发现的第一个类星体（3C 273；参看图 1-2），或者由于它是最近的射电星系（半人马座 A；参看图 1-6），或者由于它是活动星系核，带有也许是最壮观的一对喷流和射电瓣（天鹅座 A；参看图 1-8）。但是，就我们目前所知，有几十亿个星系分布在可观测宇宙的边缘，那里首次呈现存在特大质量黑洞的证据。有多少这类特殊天体在那里呢？我们疑惑不解。

许多天文学家推测，几乎每个大的正常星系都在其中心蕴含一个特大质量黑洞，这个假设已获得日益增多的证据的支持。最近，天文学家先后用设置在新墨西哥州的甚大（射电望远镜）阵〔这项工作是由来自马里兰大学的威尔逊（A. Wilson）和他的合作者开展的〕和甚长基线干涉测量阵对 100 个邻近星系进行了完整的巡天观测，发现其中至少有 30% 显示具有一个微小而致密的中央射电源，带有类星体现象的唯一特征。它们的微弱光辉显示它们是远古洪荒时代的遗存，那时这类天体中的某一些可能是从宇宙结构形成时期以来就照耀着的光芒万丈的灯塔。

另一项骄人的进展是，美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台看来解决了一个自 20 世纪 60 年代初期以来出现的、长期的未解之谜。原来宇宙也弥漫着微弱的 X 射线的辉光，它遍及整个天空。通过对一个选定的天区深度曝光〔参看 Mushotzky *et al.* (2000)〕，钱德拉 X 射线天文台能够把至少达 80% 的 X 射线的辉光分解为无数个单点光源，由此外推至整个天空，表明总数约有 7000 万个。实施这项观测的研究人员随后对这类天体中的一些进行跟踪研究，用望远镜探测它们在其他波段的辐射，得出了结论：有一些是相当正常的星系，带有尘埃遮蔽的、辐射 X 射线的核——这正是中央黑洞的征兆。

另一些是非常遥远的类星体，它们太暗弱，远没有图 1-2 中的类星体那么明亮。其余的要不是未知的，要不就是与特大质量黑洞无关的。诸如此类的通过巡天观测得到的图像表明宇宙布满着一小块一小块的孤立时空。它们的子集早就形成了，大爆炸后的原始时代，气体云凝聚成的团块聚集形成了第一批星系，这些子集甚至可能在此之前形成。其中一些可能是宇宙的“黑暗时代”里的真正化石，这个时期在大爆炸后的冷却与恒星



形成时代之间延续了数亿年。然而，现在看来它们全部都驻留在星系核里——这就是说，从来没有发现过孤立的特大质量黑洞。

我们之中比较保守的人士还会争辩说，这些远距离的光点是存在特大质量黑洞的高度明确的启示，但是在我们能够切实看清它们之前，或者根据更加令人信服的证据，如在第2章里对位于星系中心的人马座A*和对NGC 4258中心盘的发射微波的脉泽证明它们的存在之前，这个结论还只是不确定的。作为这一研究的先锋，得克萨斯大学的约翰·科门迪 (John 79 Kormendy) 和密歇根大学的道格·里奇斯通 (Doug Richstone) 和他们的合作者确定了自己的任务，十分仔细地收集所需的线索，以完成对尽可能多的当前掌握的这类天体的探测工作。在本书写作之际，他们已根据星系中心恒星和气体的高速旋转的随机速度，对38个星系中的特大质量黑洞进行了直接测量。这些天体是比较邻近的，因为只有在我们能够看清单个恒星环绕中心引力源运动的情况下，这类直接方法才行之有效。

现在出现了第一个令人不解的谜团——没有一个特大质量黑洞出现在没有中心核球的星系里 (参看图4-4)。正如我们所见，星系分属于两种基本类型 (目前不包括不规则星系) ——一类包含扁平的、旋转着的盘，另一类具有更接近于球形的核球，它只稍微旋转，以作随机运动的老龄恒星为主要成分。许多星系，诸如银河系和仙女星系，都由一个盘和一个位于中央的核球组成。迄今为止，天文学家已经在每一个观测到包含核球的星系里发现有一个特大质量黑洞，但是在那些仅仅具有盘但无中心核球的星系里则没有。前者可能在过去经受了一次或多次的并合，而后者可能从原始时期以来由不接触的旋转物质凝聚而成，这样，我们从这些巡天观测中收集到的第一条线索是碰撞，就如图1-5所示，由此而产生了中心的特大质量天体，这个过程会使“无核球”星系高度有序的车轮结构至少发生部分崩裂。

第二条线索只是最近才发现 [这个结果是由两个研究组独立得出的，报告于下列文献：Ferrarese and Merritt (2000)，Merritt and Ferrarese (2001)，and Gebhardt *et al.* (2000)]，看来这一情况是明确无疑的，即大多数星系与它们的特大质量黑洞是同时成长的。后者非但不是宇宙中的



图 4-4 这张像是旋涡星系 NGC 2613，于 2002 年 2 月 26 日由设置于智利帕拉那尔的甚大望远镜 MELIPAL（在马普切语里的意思是“南十字”）拍摄。对其中心的特大质量黑洞的探索没有获得结果（Bower *et al.* 1993）。现在有占优势的证据表明，盘高度扁平的星系没有显著的中心核盖，即球状结构，也就没有特大质量黑洞在其核心。另一方面，每个确实具有中心核球的星系（例如草帽星系；参看图 4-3）也拥有一个特大质量黑洞（承蒙 VIMOS 协作组的 O. Caputi, M. Scodeggio, G. Sciarretta, O. Le Fevre, S. Brau-Nogue, C. Lucuix, B. Garilli, M. Kissler-Patig, X. Reyes, M. Saisse, L. Arnold 和 G. Manciniand 以及欧洲南方天文台惠赐照片）

- 80 破坏性因素，看来正是它们所在处结构建设的基本要素。新泽西州鲁特格斯州立大学和奥斯汀的得克萨斯大学的研究人员十分令人信服地证明，中央黑洞的质量能够以很高的精度确定，只需测知在寄主星系的球形结构内绕转恒星的速度即可。在光线和运动的大湍流里要精确地测定单一天体的径迹是困难和不切实际的。相反，天文学家能够从星系的中心核盖的有限区域测量累积的光线，并从它们显示的整体多普勒漂移求出整个星群的平



均速度。他们发现，综合他们巡天观测的全部星系样本，黑洞质量与这一平均速度之比是一常数。

在关于宇宙如何获得其结构的研究中，这个相关性是最惊人和重大的发现之一。面对到手的数据，有人也许会想，在特大质量黑洞与寄主星系核球之外的恒星运动之间不应该有联系，因为在那里由前者产生的引力影响是完全不存在的。看来特大质量黑洞“了解”难以直接感受其引力影响的遥远恒星的运动。排除沉重的黑洞在原始宇宙结构汤内猛撞乱闯地掀起狂澜这种简单而幼稚的图景，这种紧密的联系促使我们假设在中心黑洞与星系晕内熙熙攘攘的恒星活动之间有纠结交错的历史渊源。虽然它们今天已不再有因果相连，但在过去一定有联袂登场的起源。

原来星系的大约 0.1% 的明亮质量与中心黑洞有关。从总体上来看，这些天体的密度与根据许多类星体的观测所预期的数值相当，现在已看到这些类星体的终点是潜藏在不那么“正常”的星系核心内比较沉稳的巨兽。天体物理学家掌握了这些事实，并深信大多数特大质量黑洞与它们的寄主星系共同成长，他们假设初始的物质凝聚一旦形成，会在对其周围环境的直给反馈中继续增大。之所以能发生这种情况，或是由于类星体加热其环境并控制着附加物质从其邻近空间向它掉落的速率 [Silk 和 Rees (1998) 为了支持大质量黑洞在星系确立时期之前形成的思想，进一步提出原星系的恒星形成受到类星体的能量广泛外流的显著影响。随之产生的对星系的球形结构的反馈，就会是我们如今看到的中央天体质量与极远处恒星速度之间这种相关性的原因]，或是由于星系之间的并合影响了碰撞黑洞的成长，又以同样方式决定了周围恒星分布中的能量（因而还有平均速度）。

81

现在许多天文学家相信，大多数情况下，星系的并合——过去或者现在——最终隐藏在星系的等级式复杂结构的后面，或者有椭圆的形态，或者是星系盘加核球的结构。[提出关于星系形成模型的研究人员之间的一致意见看来是，最大的星系在其生命历程中至少经历了一次大规模的并合。参看《星系是怎样形成的》(How are Galaxies Made?), *Physics World*, May 1999, 25~30。] 在这一天体序列中，大爆炸后不久在暗物质

中形成的小的密度不均匀性，随着宇宙膨胀而增大，最终收缩成为诸如 G1 那样比较小的天体，G1 作为球状星团现在正环绕仙女星系旋转（图 4-2）。较大的星系在一波接着一波的碰撞和并合中长大，这个过程显著地造成了哈勃序列中包含的形态的多样性。正如我们马上就会看到的，详细的计算机模拟说明两个质量近似相等的旋涡星系并合的结果是结构十分类似于星系核球的星系。同时，在这一交会中心的引力场的扭曲，驱使大部分气体聚集在中央，它们在那里形成新恒星并馈赠中心黑洞或黑洞对。黑洞质量与星系晕内恒星平均速度之间的紧密相关，看来是这一宇宙分级过程中的直接结果。

82 星系碰撞

类星体 QSO 1229+204 是我们在漫游可观测宇宙路途中的一个佳境，它极其明亮，以致只能由具有高分辨率的哈勃空间望远镜才能把强大的辐射与暗淡得多的寄主星系区分开来（参看图 1-3）。值得注意的是，QSO 1229+204 位于一个被一条黑带贯穿中间的异常旋涡星系的核心，而且当前正处在与另一个较小星系的碰撞过程之中。几乎可以肯定，因这次碰撞而受到剧烈扰动的气体正在传输进入活动的、翻腾的核心，并在那里成为特大质量黑洞的燃料，从而导致它如此明亮地照耀。

在星系碰撞的游戏中，我们也是活跃的参与者，不久当我们随之考虑仙女星系向银河系的咄咄逼人的加速度的时候，我们就会知道了。然而，直到不久以前，这类星系灾变的终极产物还是不确定的，天文学家曾经必须去识别并合的产物，其来源显然是两个星系核的碰撞。在 2002 年年底，这种情况突然改变了，当时科学家首次得到证据，表明两个特大质量黑洞并存于同一星系之内。美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台聚焦于一个蝴蝶形的星系 NGC 6240 的核心，人们认为这个星系是两个较小星系在大约 3000 万年前碰撞的产物，拍到的照片显示这两个天体互相绕转，相距只不过 3000 光年（参看图 4-5）。几亿年之后，它们的轨道将缩小，以致在宇宙规模的壮丽闪光中产生一个更大的黑洞，那时将发生强烈的辐射和引

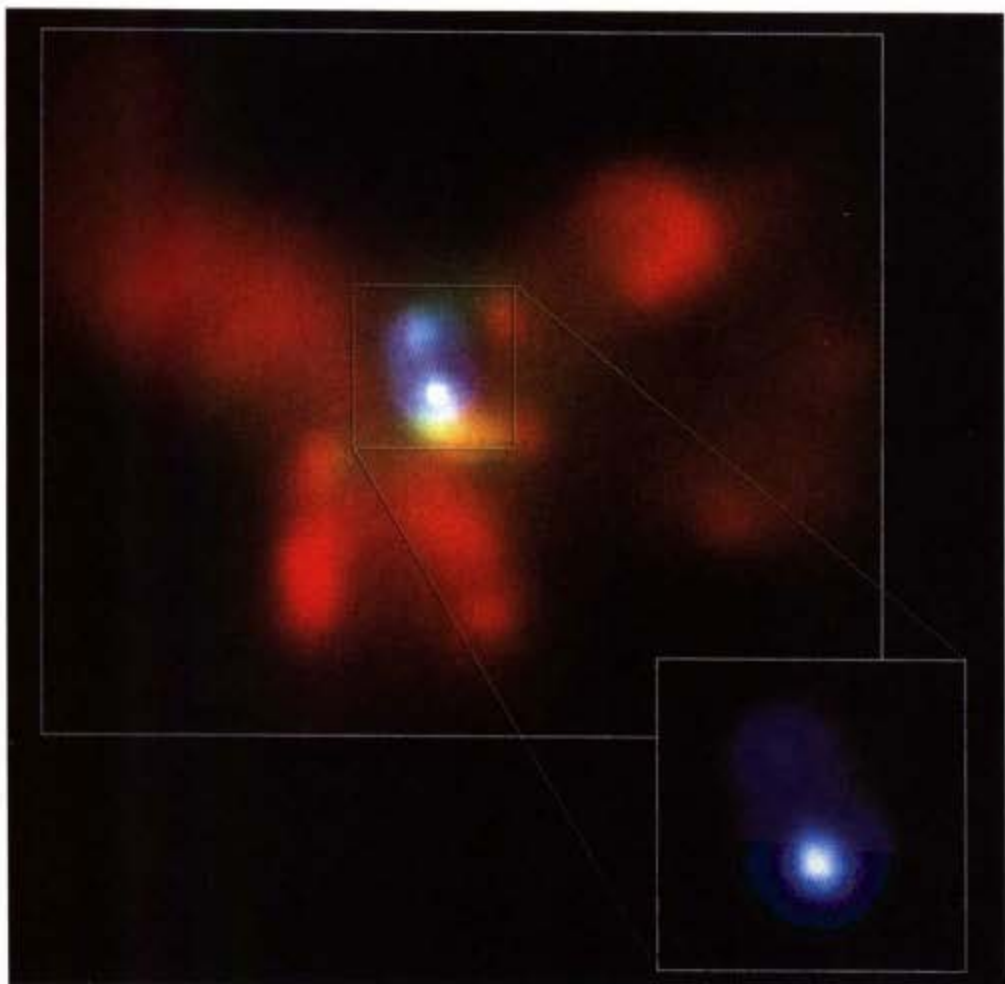


图 4-5 NGC 6240 是一个蝴蝶形的星系，人们相信它是两个较小的星系在大约 3000 万年前碰撞的产物。它是一个“星暴”星系，由于并合产生的扰动使得恒星的形成、演化和爆发以超常的高速率进行。这张钱德拉 X 射线天文台拍摄的 X 射线像（穿透 34000 光年）显示并合活动产生的热量把气体的温度提升到几百万度。这里我们第一次看到直接的证据说明在这样一种结构的核心内包含不止一个而是两个活动的特大质量黑洞，这由围绕每个明亮天体旋动的气体发出的超量高能光子和从近旁气体中的发荧光铁原子发出的 X 射线可见。人们推测这两个黑洞正在穿越 3000 光年的距离相向运动，并在今后几亿年之内合并成一个更大质量的天体（承蒙 S. Komossa, G. Hasinger 和 J. Centrella, 马克斯·普朗克地外物理研究所和美国宇航局惠赐照片）

力波爆发。

钱德拉 X 射线天文台因其从远距离清晰地分辨密近天体的能力而创造了这个突破性成果，它还测定了从每个核心发出的 X 射线的细节。在周围炽热的旋涡气体中产生了超量的高能光子，游离的铁原子发出辐射，
83 如同在 MCG-6-30-15 星系旋转黑洞的情况（参看第 3 章），都暴露了两个源的黑洞的本质。

正如类星体 QSO 1229+204 的寄主星系一样，NGC 6240 是一个正在经历在核心中形成恒星的大质量星系，恒星的形成率由于最近的碰撞而异乎寻常地迅速。在交会中大量的尘埃和气体被驱赶到中央，这使得很难用光学望远镜看清它中心区域的深处，但是 X 射线能轻易地穿透厚重的幕障，为宇宙大爆炸之后最剧烈的现象之一制作了如此绚丽夺目的图像。大质量黑洞显然能够通过并合较小的坍缩天体而增大，甚至可能产生引力波爆发，而这将能用未来的空间仪器探测到。（根据钱德拉 X 射线天文台上的高级 CCD 成像摄谱仪实施的观测，德国马克斯·普朗克地外物理研究所的 Susan Komossa、Gunter Hasinger、V. Burwitz 和 P. Predehl，荷兰空间研究组织的 J. Kaastra 和位于巴尔的摩的马里兰大学的 Y. Ikebe 发现了 NGC 6240 核心中的双特大质量黑洞。）

设于波茨坦附近戈尔姆的马克斯·普朗克引力物理研究所（又称阿尔伯特·爱因斯坦研究所）的科学家们在所长伯纳德·舒茨（Bernard Schutz）的领导下用超级计算机模拟了两个大质量黑洞的擦掠碰撞，希望能识别在这种交会期间发射的引力波带着的宇宙印记。在星系的并合中，由于特大质量天体在通过周围的星团时经历了“挤轧”，它们迅速地沉落到融合的系统中心。每个黑洞沿着轨线失去能量，与自己的搭档越来越接近，终于形成了星系中央的非常紧密的双星。

人们已经研制出主要用来探测这类源产生的辐射的最先进的仪器，下面将要着手攻克的最激动人心的技术难题是探测引力波²。正像两只浮标在平静的水面上互相绕着打转时会产生向外扩散的波浪一样，两个转动着的
84 的黑洞通过周期性地提升和降低引力强度，扭曲着周围时空。这种扰动从这个系统以光速向外传播，向宇宙扩散，并在空间结构中产生涟漪。在局



部范围内，这表现为任何两个点之间距离的细微改变。

由阿尔伯特·爱因斯坦研究所的物理学家以及他们在圣路易斯的华盛顿大学和在柏林的孔拉德-楚泽中心的同事们进行的模拟表明，黑洞在向内盘旋的最后短短的时刻内，会辐射微弱的周期性引力信号。两个天体的视界伸展着，在几毫秒左右的时间里像雨滴般结合起来。当统一的视界的振荡衰减下去和最后的黑洞变得平静时，信号的强度及其频率在消失之前迅速增加。

这些计算显示，在交会中高达可用的总能量的 1% 的能量能够转化为引力波。这比太阳在过去 50 亿年里释放的全部能量要多几千倍。但是宇宙中许多最大的爆裂都发生在极其遥远的地方，以致到达地球的信号极度微弱。这里的效应是推动相距 1.1 千米的质量振荡，振幅只有一个质子直径的 1/1000。

虽然引力效应本身以光速传播的思想在 20 世纪下半叶得到了许多实验的证实，但是引力波还没有被直接检测到。人们观测到脉冲双星 PSR 1913+16 的轨道正在缩小，原因在于能量被散逸的引力波带走了。能量的耗散率取决于有限的传播速度，因此轨道改变能够被看做等价于速度的测量。这种衰减终于发生，这一事实强有力地表明了有某种东西（也就是引力波波阵）正在离开系统，而且一定是以有限的速度进行着——否则的话，将在瞬间发生整体坍缩。当前的测量证实了引力速度等于光速，精度 85 在 1% 以内。[关于这一主题的专业参考文献，参看 Damour (1987)。]

物理学家对引力波的实际探测，通过与他们现在已作的预言比较，将能提供关于结合中的黑洞的质量、自转、定向、可能还有两者间距离的直接信息。空间激光干涉天线 (LISA) 卫星是目前正在研制中的空基引力波望远镜，有望于 2010 年之后发射升空，它的主要目标之一就是开展这么一项前景辉煌的基本测量。地基引力波探测器业已问世，但是它们还不够大，探测由双特大质量黑洞产生的长波引力振荡尚不敷应用。

空间激光干涉天线卫星由 3 艘宇宙飞船组成，它们在一个三角形的顶点上飞行，彼此相距 500 万千米，将探测经过的引力波，接收每对子星之间空间的拉伸和挤压。其间的移动确实极其微小——不超过原子直径的几

分之一——但是用激光干涉仪应该能探测得到。空间激光干涉天线卫星的灵敏度足以探测双黑洞的并合——无论在何处发生，甚至到可观测宇宙的边缘。所以，天文学家已经知道全宇宙内星系碰撞和并合的频次，估计这类惊心动魄的事件会让仪器大约每两年触发一次。

仙女星系与银河系的碰撞

假定人类还能在未来的 50 亿年中继续生存，我们的后代将能亲眼见证翻天覆地的大灾难：银河系与仙女星系的碰撞和并合。仙女星系是银河系最邻近的大星系（参看图 4-6），并合后的星系比原来的两个都要大而且一点不像它们。我们的后代看来将生活在一个椭圆星系里，它包含着原来在相邻的星系内经历灾难和变迁而幸存的老年恒星。但是这次将不是两个星系遭遇的这类交会的第一次。1991 年当行星照相机被安置在哈勃空间望远镜上之后，它对准了仙女星系的核心，使天文学家看到了一个出人意料的景象——显示出不是一个，而是两个斑点，相距只有 30 光年。随后地基望远镜也迫不及待地进行了观测，证实了确实有两个核存在于这个旋涡星系内，而且它们相互绕转。人们推测一个核是特大质量黑洞，而另一个核是很久以前被仙女星系摧毁并吞食的小星系的残骸。

银河系与仙女星系正在以每小时 48 万千米的速度相互接近。我们是准备接受迎头相撞呢，还是擦边相碰（这种方式将能在最后的并合前延长致命的交会），这取决于仙女星系在天空的切向运动。天文学家正以越来越高的精度不断地对此进行测量，更强有力的望远镜也正在制造之中。碰撞的整个过程本身将持续几十亿年，所以对于任何一个文明而言，都难以实时完全欣赏——在时间上和空间上——如此大规模的相会。

然而，计算机的模拟确实提供了一个激动人心的景象，展现两个星系如何解体并最终形成一个巨大的椭球状的恒星集团——与在哈勃序列中的椭圆星系相似。当前，仙女星系看来只是在北半球秋夜星空中纺锤形的一个光斑。它在 220 万光年的远处——这个距离约为银河系直径的 20 倍——不足满月宽度的 4 倍。随着两个星系相互靠近，我们的后代将看到



图 4-6 这张像连同图 4-8、图 4-9、图 4-10 和图 4-11 都是在计算机模拟中拍的快照，以展示银河系与仙女星系的碰撞是如何演化的。计算过程是在圣迭戈超级计算机中心的蓝色地平线机上进行的，这是一台具有 1152 个处理器的 IBM SP3 机。每个旋涡星系设想为具有 4000 万颗恒星，包围着由 1000 万颗粒子构成的暗物质晕。这张像代表的空间大小近似为 50 万光年。这里银河系看来面朝观测者，处于下方，而仙女星系是倾斜的，处于上方。在这第一张像里，两个星系正在它们相互引力的作用下加速彼此靠近。在它们碰撞之前，它们的形态不会有显著改变（承蒙多伦多大学的 J. Dubinski 惠赐照片）

仙女星系日益增大，在天空投射一股明亮而不祥的光芒。

在两星系交会的时期里，横亘天空的著名的银河将与第二个天河相交，这一景象将持续约 1 亿年，直到这两个星系开始互相渗透。在此期间，大的冷分子气体团（每个的尺度达几百光年）将受到压缩并爆发新的光芒，它们将照亮宇宙中原先黑暗的区域。天空中的混乱日益增长，支离破碎的气体 and 尘埃条带杂乱无章地散布在数以百万计的明亮的年轻恒星和星团之间。我们银河系和仙女星系美丽的旋涡盘中在几十亿年中形成的结构，在它们相互的引力影响下开始解体。

在经历了碰撞的大约 4000 万年之后，在某个遥远星系内的观测者将看到银河系与仙女星系十分类似于我们现在看到的 NGC 2207 与 IC 2163（参看图 4-7）。这两个天体已经进入了交会，后者的潮汐尾巴把恒星和气体向右端扫出 10 万光年之遙便是明证。由 IBM 研究部的布鲁斯·厄默格林（Bruce Elmergreen）和瓦萨学院的德布拉·厄默格林（Debra Elmergreen）领导的研究组对这次交会做了计算模拟，表明 IC 2163 循逆时针方向旋动着越过 NGC 2207。然而，就像我们的星系与仙女星系将要发生的碰撞，在这一活动阶段，相互作用尚未结束，因为 IC 2163 没有足够的能量从对手的引力魔爪下挣脱出来，而且注定会在今后再次被拉进大星系里去。这两个星系沉溺于双人舞中不能自拔，将继续彼此间的扰动和裂解，在从今往后的几十亿年内并合成一个单一的、质量更大的结构。

银河系和仙女星系在它们开始碰撞之初（参看图 4-8），由于还在彼此绕转，因此尚能苟延残喘，然而对它们形态的一系列无可避免的扰动已经开始。仙女星系在被银河系掠过之后，也许还要再花 1 亿年进行一个缓慢的、优雅的 U 形回转，然后栽入密近的迎头相撞，直捣银河系的核心。不久之后形成的延展深广的旋臂把恒星和气体抛入星系际介质之中，只保留星系核，等待未来一轮灾变（参看图 4-9 和图 4-10）。伴随着每一阶段的变化，出现了恒星形成的更壮观的热潮，这时一连串超新星爆发将把遗迹中留存的大量气体和尘埃驱除出去。最后，在这次灾变的 10 亿~20 亿年后，来自这两个星系的恒星将混合起来，形成单一的椭圆星系（参看图 4-11）。



图 4-7 随着碰撞的进行，数十亿年来标志银河系和仙女星系平面的美丽的旋涡盘，将在两个不幸的庞然大物的引力作用下解体。当仙女星系向我们赫赫而来时，周围的天空将变得明亮起来，因为在支离破碎的气体和尘埃的条带内产生明亮的新恒星和星团。由哈勃空间望远镜拍摄的这张像，展现了一对相互作用的星系：NGC 2207（左边较大和较重的天体）和 IC 2163（右边较小的天体），它们位于大犬座，离地球约 1.14 亿光年。如果从某个远距离星系回望银河系和仙女星系，可以看到类似于这张图的景象，相当于由图 4-6 开始的相互作用之后约 4000 万年的情形。这时在 NGC 2207 强大引力产生的潮汐作用下，IC 2163 的恒星已开始向右端冲去（承蒙瓦萨学院的 D. M. Elmegreen，IBM 研究部的 B. G. Elmegreen，美国宇航局以及空间望远镜科学研究所和美国大学天文学研究学会所属的哈勃学术研究组惠赐照片）



图 4-8 在碰撞开始之后的约 2.7 亿年，两个星系相互旋转着经过，引力作用激发几个旋臂张开。银河系（图的上部）和仙女星系开始分裂。引力产生的潮汐力产生了长长的物质羽状物，类似于触须星系所见的尾巴（参看图 1-5）（承蒙多伦多大学的 J. Dubinski 惠赐照片）

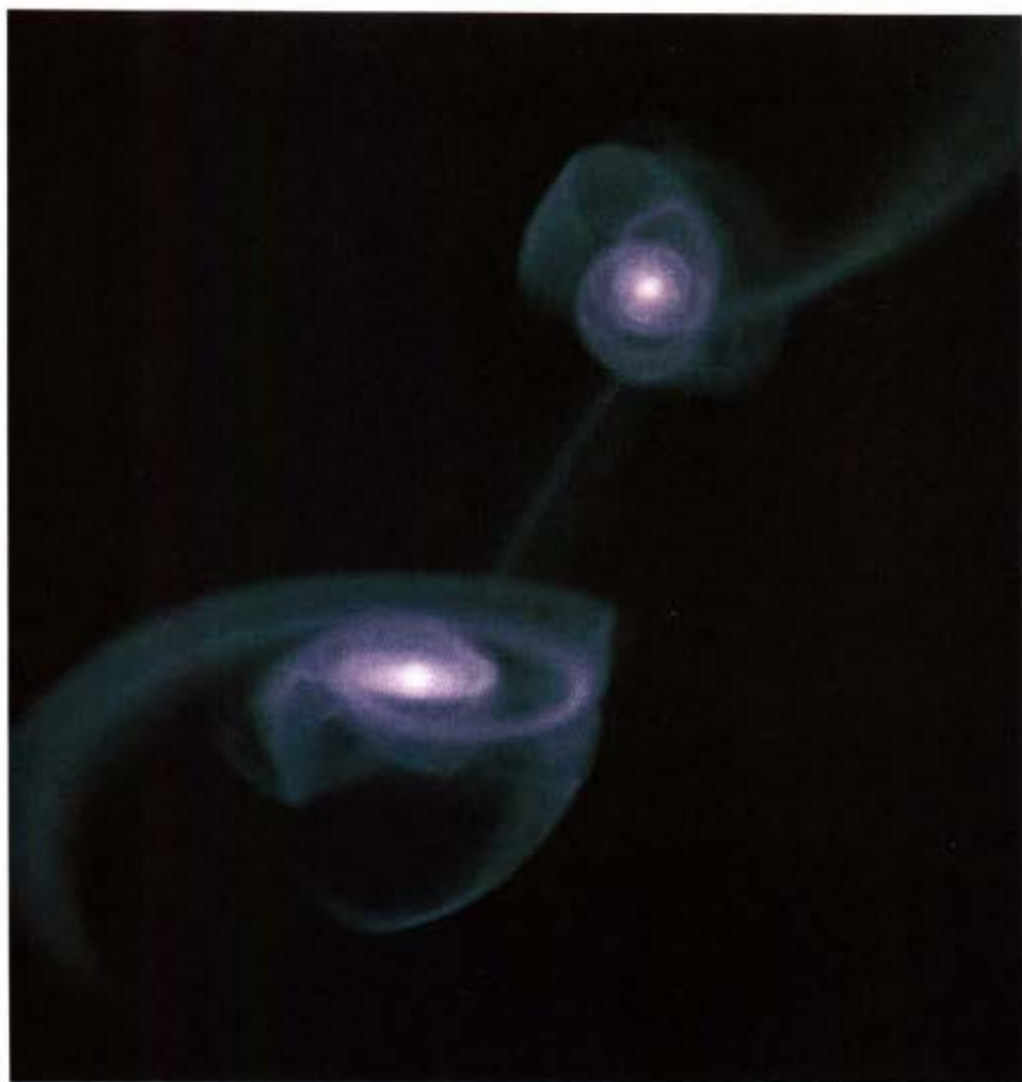


图 4-9 这张图像表现碰撞开始后大约 7.2 亿年时恒星的扰动，星系在第二次交会中再次回落到一起，并使它们进一步分崩离析，导致中心区域的物质迅速并合（承蒙多伦多大学的 J. Dubinski 惠赐照片）



图 4-10 在开始碰撞后大约 10 亿年，两个星系发生一系列的灾变，导致它们的旋涡图案继续瓦解。每个星系各有一部分通过扩展的潮汐尾巴而被扫入星系际空间（承蒙多伦多大学的 J. Dubinski 惠赐照片）



图 4-11 最后，在银河系与仙女星系开始它们的引力双人舞之后的 12 亿年，中心区域将合并成单一的恒星聚集的遗存。作为灾变的后果，看来出现了比原来质量更大的黑洞，现在潜藏在这两个星系的核心。这个特大质量天体风卷残云般地吞噬剧烈涌动的气体，将点火形成类星体。但是我们必须等待约 50 亿年才能看到所有这些壮观场景。究竟我们的太阳系是作为这个新星系的成员留在里边，还是被抛到几乎空无一物的星系际空间，将取决于交会时太阳位于轨道上的位置。根据计算机的这种模拟，估计这两种结果出现的机会相等（承蒙多伦多大学的 J. Dubinski 惠赐照片）



图 4-12 钱德拉 X 射线天文台研究了 NGC 253 的核心，这是一个比较近的星系，离地球约 1000 万光年。在这个距离上，如左下角所示的 3 角分的线段，相应的空间尺度为 9000 光年。虽然之前没有任何证据显示这个天体有任何集中于其中心的 X 射线活动区域，钱德拉 X 射线天文台还是在那里发现了 10 个以上超亮的源，其中 3 个完全位于离星系核 3000 光年的距离之内（参看图 4-13 的放大像）。如果这些是中等质量的黑洞，它们可能会移居到星系中央，产生一个鼓鼓囊囊的特大质量黑洞系统（承蒙美国宇航局戈达德空间飞行中心的 K. Weaver 以及约翰·霍普金斯大学的 D. Strickland 和 T. Heckman 惠赐 X 射线像；承蒙空间望远镜科学研究所和数字巡天项目惠赐光学黑白照片）

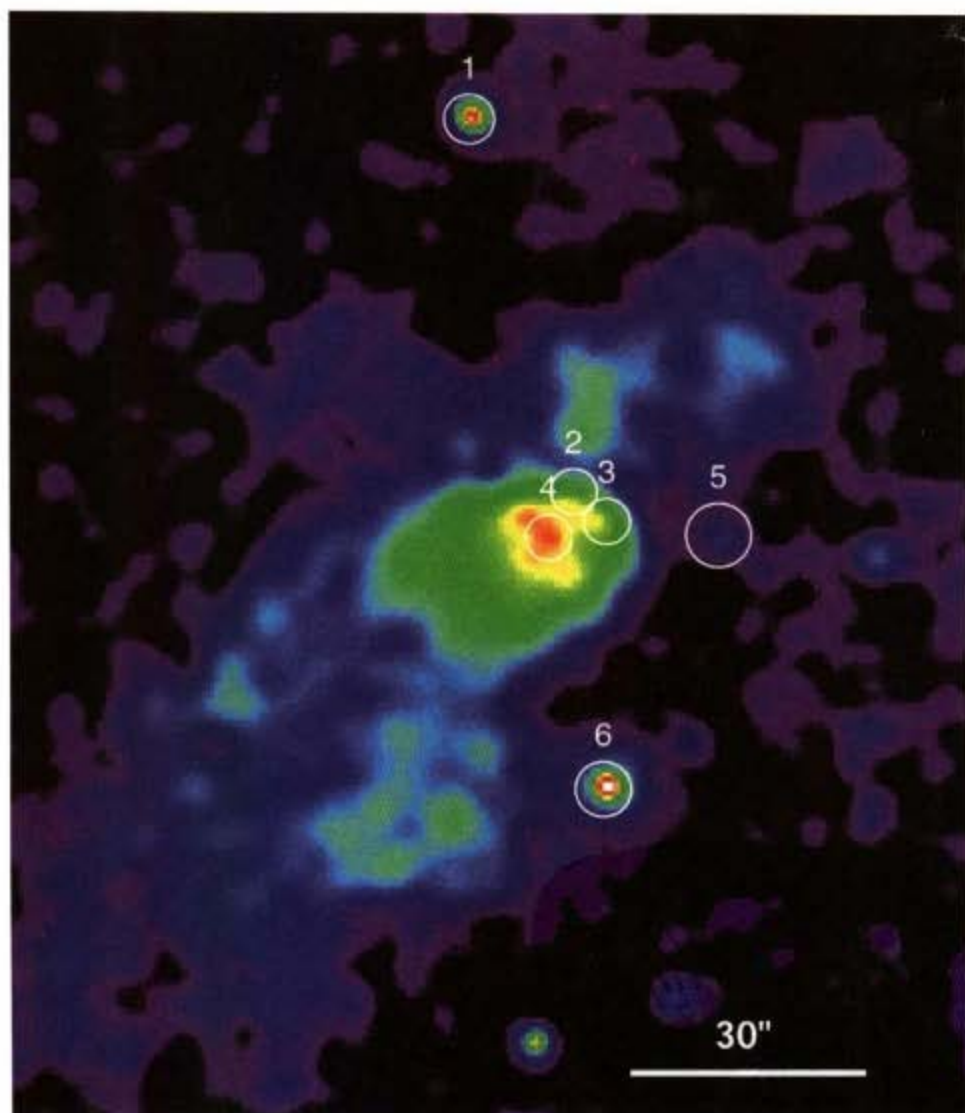


图 4-13 这是图 4-12 所示的 X 射线像的放大图。右下角 30 角秒的线段相当于约 1500 光年的空间距离。正文中讨论的超明亮源，在图中清楚地表示为以 1~6 的数字标明的亮点。中间的 3 个天体被认为正在引力作用下向星系中心移居，分别用数字 2、3 和 4 标注。这 3 个中等质量的天体在通过新生的大质量恒星的密集区域时，由于摩擦和向中心的逐渐盘旋而损失能量（承蒙美国宇航局戈达德空间飞行中心的 K. Weaver 以及约翰·霍普金斯大学的 D. Strickland 和 T. Heckman 惠赐图像）

银河系和仙女星系作为威严的旋涡星系的那一天将一去不复返，我们的后代将看到的景象取决于太阳的遭遇如何。就我们的太阳系而言，有两种可能的命运，取决于在碰撞发生之际它在环绕银河系旋转轨道上的位置。第一种情况，太阳可能陷入潮汐尾巴，与其他数百万颗倒霉的恒星一起，被抛进星系空间的无边黑暗。如果发生这种情况，我们的太阳系将处于十分孤立的境地，周围没有几颗恒星为伴，而夜空将十分黑暗，只有少数几点余辉闪烁不定。

第二种情况是，太阳受裹胁进入并合潮流的中央，那里爆发了新恒星形成的高潮。首先，在这个环境中超新星的爆发率很高，可能高至1年发生好几次，所以夜空辉映着逐渐暗淡的超新星壳层的微光。在这种情况下，常规的地基天文学将遭遇困难，但是，人们会怀疑那时是否还必须追随这种古老的方法！未来的天文学家还将眺望繁星密布的天穹，并千方百计去观测刚刚形成的椭圆星系的核心。那里没有任何迹象显示过去曾经有过两个分离的旋涡星系：在沉沉黑暗中跳着危险的舞蹈，在遥远的被遗忘的文明里，一个叫做银河系，另一个叫做仙女星系。

89 谁知道呢？那时的天文学家可能不必再去张望宇宙的边缘，去观测全速退行的类星体。我们银河系中心黑洞的质量约300万太阳质量，而它的在仙女星系核心的伙伴的质量要大10倍。它们的结合以及随后对并合的遗迹中央翻腾气体的狼吞虎咽的吸积，将会产生一个质量达1亿太阳质量的巨型天体。所以宇宙中演化的故事将会继续，星系并合，特大质量黑洞在它们耀眼和剧烈的熔炉中成长，而这一个——将在我们中间产生的这一个——将用它的弟兄们的能量发动起来，而后者现在正从鸿蒙初辟以来照耀着宇宙。50亿年之后，我们的后代可以不必超越新星系的中心，也许只在5万光年的近处就会看到一个充满青春活力、光辉灿烂的一类星体。

中等质量的黑洞

我们将要以有些推测性的内容——涉及一些严肃的黑洞搜索者当前正在进行的最新研究——来结束这一章。虽然关于存在特大质量天体的各种



实例已占有压倒优势，而且相当完整，但是天文学家总是为这个念头而惴惴不安，为什么黑洞只有截然不同且毫不相关的两种类型呢？一种是由超新星爆发产生的，质量只有 10~20 太阳质量，另一种是从几百万至 10 亿太阳质量的巨兽，它们正是我们在本书中考虑的。广义相对论对于这类天体的质量没有规定任何限制，那么中等大小的黑洞在哪里呢？

不错，科学家们认识到中等质量黑洞可能已经在几年前被发现了，不过还没有证实，它们的存在还是不确定的，科学家们正对此进行着热烈的争论。在首次被发现时，所谓的超亮 X 射线源只引起了不温不火的关注和理论分析。然而，在恒星大小天体的行列中，它们的亮度是特殊的，因为 10 太阳质量的黑洞发送太多的辐射去阻止周围物质吸积到自身上去——这正是宇宙版的“剜肉补疮”。但是，如果我们着眼的这个天体比较大，这个问题就容易解决了，因为强大的引力能够压过向外辐射的力量。果真如此，那么这个解释就印证了特高光度 X 射线源是质量为 100~1000 太阳质量的中等大小黑洞。一些天文学家，如哈佛-史密松天体物理台的安德烈斯·泽扎斯（Andreas Zezas）则不同意这种说法，认为这些超亮 X 射线源本来就是一些小天体，只是把全部 X 射线都集中在一个狭小的锥体内，才使得它们看起来比实际的更亮。 90

旁观者清，这种争辩实在是不着边际，因为中等质量黑洞原则上会顺着自己的发展规律合并和增大成为特大质量黑洞。在近来开展的、由德国主导的 ROSAT（X 射线卫星）巡天计划中，卡耐基-梅隆大学的安德烈·普塔克（Andrew Ptak）和约翰·霍普金斯大学的爱德华·柯尔伯特（Edward Colbert）在距地球 2 亿光年范围内的 750 个星系中间搜寻这类源，并发现了每 35 个这类源中就有 1 个的质量为 100 太阳质量，有的源的质量甚至更大 [由 ROSAT 巡天计划观测到的中等大小黑洞的综合表见于 Colbert and Ptak (2002)]。

美国宇航局的钱德拉 X 射线天文台接受了更好地确定这类特殊天体的挑战，它在过去几年里揭示了其另一个有趣的特性。看来“星暴”星系比其他星系具有相应的较高数量的中等大小黑洞。顾名思义，星暴星系的特点是拥有异常高的恒星形成率，由于年轻的大质量恒星高度集中和超新

星爆发，因此它们具有非同一般的亮度。天文学家认为，在这种理想条件下，会出现许多 10~20 太阳质量的黑洞——并最终合并，导致在这些星系里中等质量黑洞的出现有较高的机会。

更令人兴奋的发现是至少有一个这样的星系（见图 4-12 和图 4-13）显示好几个中等大小的黑洞潜藏在其核心里。星系 NGC 253 是一个比较近的典型的星暴星系，距离地球约 1000 万光年，在其中心区域未曾有过黑洞活动的征兆。然而，当钱德拉 X 射线天文台聚焦于它的核心时，发现 91 了 10 个超明亮的点源，其中 3 个位于距其中心 3000 光年的范围之内（参看图 4-13），它们被限制在这么小的体积之内是非同寻常的，暗示着它们可能是从遥远的诞生地移居到了这里。[美国宇航局戈达德空间飞行中心的 Kimberly Weaver 以及约翰·霍普金斯大学的 David Strickland 和 Timothy Heckman 开展了这项工作。这个研究组用钱德拉 X 射线天文台的高级 CCD 成像摄谱仪观测了 NGC 253 共 3.5 个小时。]

这 3 个中等质量的黑洞正一往无前地向 NGC 253 的中心进发，星系的中心黑洞正在引诱它们投怀送抱，它们有朝一日终会与它会合，然后通过从周围介质吸积物质而继续增大。换言之，这个星暴星系会在我们的眼皮底下转化成为类星体状的天体。但是我们还必须等待进一步的进展，以肯定特高光度 X 射线源确实是中等大小的黑洞。

新学网
PDG

5 等离子体的相对论性喷射

天文学家所能目睹的遥远的宇宙深处壮丽的黑洞现象，并不是黑暗的 92
视界在明亮的背景光前隐隐显现，而是等离子体的相对论性喷流穿透了星
系际空间的沉沉黑暗。在自然界最令人头晕目眩的宇宙景象中，大约 1/20
的已知的特大质量黑洞周围的介质显示有这种高能粒子流。正是在第一张
类星体 (3C 273) 的照片上，突现了一个夺目的喷流，在当代的钱德拉 X
射线天文台拍摄的像上 (参看图 1-2)，高能射线的光芒还要更加明亮。
然而，在大多数情况下，黑洞的喷流显示在“平行的”宇宙里——确实，
几十年来，它们幽灵般地现身，为特大质量黑洞的发现抢了先机，虽然当
初没有征兆表明它们今后将会揭示什么。天文学家们要再次感谢电话公
司，因为科学史上最令人赞叹的进展之一——在 60 年之后由于太空商业
化而发现了宇宙微波背景辐射——就是在它们的推动下取得的。

古列尔莫·马可尼 (Guglielmo Marconi, 1874~1937) 演示了光的本
性——如同一连串的波在时空中传播，不久之后的 1901 年，他就成功地
开创了飞越大西洋的无线电通信。这项技术的商业用途遍地开花，无线电
设备被安装上船——包括泰坦尼克号，要是没有它与邻近船只的无线电通
讯，这次悲剧还要更惨，无线电设备毕竟救出了 705 名旅客。大的电讯公
司的成立更好地满足了人们在大陆与大陆之间互相沟通的日益增长的需要。
电话公司意识到可以在 10~100 米的波长范围内进行短波通信开展洲 93
际电话业务，而不必花费巨资铺设越洋海底电缆。但是任何一名业余无线

电收发报爱好者和短波电话的收听者都清楚地知道，短波通讯受到严重的天电干扰和恼人的噪声影响。

在位于新泽西州的美国电话电报公司（AT&T）的贝尔实验室里，当时年轻的无线电工程师卡尔·古特·央斯基（Karl Guthe Jansky, 1905~1950）被分配了一个任务，要求识别可能干扰无线电声讯传输的短波噪声的来源（参看图 5-1）。为此他在 1931 年建造了具有高定向性的天线，接收波长约 14.5 米的信号，并把它安装在可旋转的支架上（被戏称为“央斯基的旋转木马”），它能指向任何方向（参看图 5-2）。经过数月的正规观测，他识别出 3 种类型的天电干扰：近处的雷电、远处的雷电和未知来源的微弱而稳定的“嘶嘶”声。

央斯基花费了一年多的时间力图阐明第三种干扰的本质，它每天有一次起伏。央斯基曾经闪过一个念头，认为他看到的辐射来自太阳，但是几个月之后，却看到信号中的最亮点在不断移动。他发现了这个奇怪而烦人的重复周期——信号起伏不是每隔 24 小时，而是每隔 23 小时 56 分。大多数天文爱好者都知道，这是一条线索，表明辐射源固定于恒星之间，而不是太阳，因为地球沿轨道的前行导致空间的固定点每天提前 4 分钟经过中天。

央斯基就此发现了辐射集中于银河中的人马座。这个特殊的无线电噪声源显然与银河的中心有关，因为当时人们已经知道银心就在天空的这一部分。他的惊人的声明发表在 1933 年 5 月 5 日《纽约时报》的头版上。央斯基渴望更深入地了解这种神秘的无线电辐射，恳请贝尔实验室建立 94~95 30 米碟形天线，但是他得到的答复是公司需要研究的是背景天电干扰，而且这位年轻工程师也被委派了另一项任务。世界的首位射电天文学家在做出自己的第一个发现之后，就这样结束了自己的科学生涯——可这是多么了不起的成就啊！

虽然起初大多数的科学家并没有认识到央斯基发现的意义，可是这个消息终于传到了伊利诺伊州的惠顿，启发了在那里的格罗特·雷伯（Grote Reber）去研究宇宙无线电波，他也是一位无线电工程师。在 20 世纪 30 年代，雷伯向贝尔实验室申请与央斯基一起并与世界上的天文台协同工



图 5-1 卡尔·古特·央斯基，设于新泽西州霍尔姆德尔的贝尔电话实验室的无线电工程师，为了探寻正在冲击着方兴未艾的无线电通信领域的干扰源，建造了首台“射电望远镜”（参看图 5-2）。在这一过程中，他发现了来自地球大气层外的无线电波，它们强烈地集中于在人马座的银河系中心（承蒙美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）

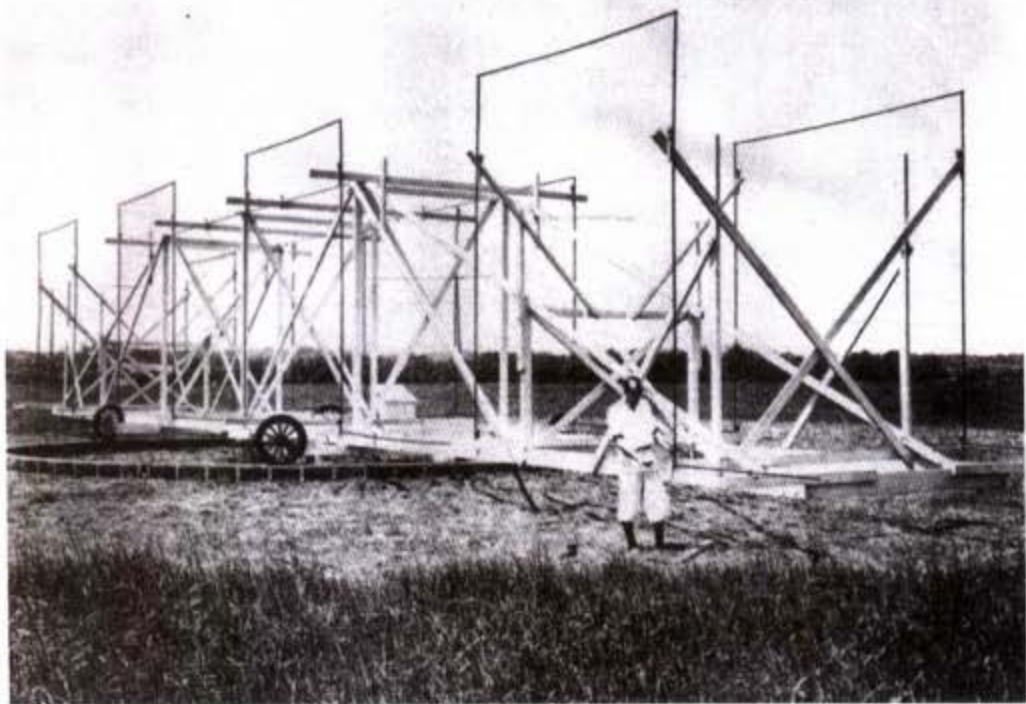


图 5-2 卡尔·古特·央斯基接受了一个任务——确定为横越大西洋的无线电通信所用的短波，为此他建造了这台为在约 14.5 米的波长上接收无线电波的天线。他把天线安装在可旋转的架子上，能够测定任何信号的方向。用这种方法，他发现了位于人马座的银心产生强烈的、集中的无线电波，从而开创了射电天文学的领域（承蒙美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）

96 作，但是当时经济危机席卷全球，他们中没有人受到雇用。所以这个世界上的第二位射电天文学家只能于在芝加哥的一家无线电公司上全日班的同时，在自家的院子里打造了一台 32 英尺（约 9.75 米）口径的抛物面碟形天线。

雷伯发现白天汽车发动机点火会产生太多的干扰，于是他在夜间扫描天空，终于在 1941 年得出了第一个射电巡天结果。不久之后，天文学家利用了第二次世界大战期间获得巨大进展的微波技术（雷达便是这一技术

的产物)去探测射电宇宙——与我们感知的宇宙并存的隐藏着的现实世界——于是射电天文学繁荣起来了。

雷伯画出了不同强度区域的等强度线图,展示了他的观测资料,不仅证实了央斯基的发现,即天空射电最强的区域位于南天的银河系中心方向,而且同样令人震惊地揭示了在其他星座存在的一些亮的射电源,包括天鹅座的射电源。今天我们(通过以无可比拟的高得多的分辨进行观测)已经知道这是特大质量黑洞引起的相对论性等离子体喷射的最精细的表现(参看图 1-8)。

发现“平行的”宇宙,显示了射电天文学这一新兴领域的勃勃生机。随着仪器的改进和灵敏度的提高,天文学家观测到了越来越多更暗弱的射电源,射电星表内的成员数量不断增加反映了射电天文学的飞速发展(参看图 5-3)。并不是我们在夜空中所见的所有天体都发射无线电波,也不是历年来检测到的射电源都能在光学像上得到证认。但是,尽管图 5-3 中两张天图的叠合是不完全的,但是现在还是可能把几个星表内的天体相互证认。其中最显著的一个成就恰好是首批观测成果之中的天鹅座 A (1952 年曾经被认为星系在那里发生碰撞),这次证认不仅提供了这个源在银河系之外的证据,而且也说明在林林总总的射电辐射之中,一些非恒星的机制一定会造成巨量的射电波发射。[在剑桥的天文学家 F. Graham Smith 97 对天鹅座 A 精确定位之后, Walter Baade 证认它为一个暗淡的光学源,并解释为两个正在碰撞的星系。更新的解释是,这是一个巨椭圆星系,它不久前吞食了一个旋涡星系,后者留下的尘带把它分为两半。参看 Osterbrock (2001)。] 从此以后,许多类似的喷射源被发现,在本章中我们将集中探讨这类天体的特殊的物理原理。

拍摄特大质量黑洞的像

图 1-8 中两个明亮的区域是从天鹅座 A 的核心投射出来的,其延展范围令人难以置信,达银河系的 3 倍之大。它们距地球 6 亿光年,投影宽度只有满月直径的 1/10。因此,对射电天文学家的挑战是以足够高的分辨



图 5-3 这是一张在夜间光学照片上显示射电天空的复合像，光学照片所显示的是位于西弗吉尼亚州的绿堤的 300 英尺（约 91 米）射电望远镜（现在它已不存在了），它制作了这张 4.85 吉赫（GHz）的射电天图。设置颜色的方式是以较淡的阴影表示较高的射电亮度。这架望远镜的一双直径为 300 英尺的眼睛（碟形天线）在这个频率上对很低的辐射能量是敏感的，这张像显示了在它看来天空的景象如何。虽然许多在射电天空上比较明显的源同时也出现在光学照片上，但总的说来两个场景之内包含着不同类型的天体。例如，在这张图中，明亮的射电源从左下角延伸到右上角，分布在银河平面上。有些是电离氢的气体云，而圆形或环形的像是超新星爆发后的遗迹。另一个显著的差别是，我们在夜间看到的恒星是比较近的（大多数在约 1000 光年之内），本图中几乎所有的射电源都是明亮的射电星系或类星体，它们的平均距离超过 50 亿光年（承蒙 J. J. Condon、J. J. Broderick、G. A. Seielstad、美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）。

率去拍摄它们以保证能看清它们的细节。须知无线电波的波长几乎是可见光的 100 万倍，其复杂性不言而喻（参看第 1 章译注 5——译者注）。一台望远镜看清目标的精微细节的能力，首先取决于它能够把多少个波长收容进它的口径之内。所以即使是只有中等分辨能力的射电天线也要相当大的口径，才能达到与一台小型光学望远镜相同的角分辨率——基本上要几千千米。然而，这么巨大的结构在机械上是无法制造的。那么，射电天文学家是如何解决这个问题来揭示不可见的射电宇宙？通过研发射电“干涉仪”，这个问题得到了巧妙的解决。

甚长基线干涉测量（VLBI）技术不同于应用单一的巨型望远镜对天体成像，而是利用分布在一个很大面积内的较小射电（碟形）天线的阵列。来自射电源的辐射按照每个接收机在地面或空间的位置被它们在稍微错开的时间内接收，但是信号可以用强大的中央计算机结合为一，使得整个网络就像一台具有等效口径的巨型望远镜，其值就是参加观测的各组元天线之间的距离。收集到的信息记录在磁带上，并被送到控制中心作事后处理。因此，以尽可能精确的计时设备驱动这个系统很是关键，因为必须精确地知道辐射到达每个位置的时刻以综合处理不同的信号。这项功能是由高精度的氢脉泽钟实现的。

在 20 世纪 70 年代末，甚大阵（VLA）于新墨西哥州索科罗附近落成，成为过去几十年内高精度射电天文学的巨无霸。它的 Y 形阵列包含 27 台单面天线（参看图 5-4），把它的各组元天线的资料结合起来，我们获得的分辨率就相当于在用一台直径为 36 千米的单面（碟形）天线进行观测。

15 年之后，美国国立射电天文台和麻省理工学院海斯塔克天文台联合建成了第二个系统——甚大基线阵（VLBA），它的主要目的是延长基线（即阵列的有效“口径”）。这套设备包含 10 台射电望远镜，分布在跨径达 8000 千米的地球表面，从夏威夷群岛的莫纳基亚山到维尔京群岛的圣克鲁克斯（参看图 5-5）。甚大基线阵的分辨率相当于一台与地球大小差不多的单面天线的分辨率，它能分清在银心处，即 28000 光年之遥，小如地球轨道的特征，或看清比银心远 100 倍的仙女星系中的小如我们太阳



图 5-4 在新墨西哥州的索科罗，27 台射电天线 [每台直径为 82 英尺（约 25 米），重 230 吨] 布置成 Y 形的阵列，这个阵列的大小能从几百米改变到几十千米。这个天线阵的功能相当于一架干涉仪，全部天线接收的信号用电子技术结合起来，所以整个阵列犹如一台单一的巨大天线。这个甚大阵 1980 年开始运作，全世界的天文学家都可以使用它（承蒙美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）

系的天体。

甚大基线阵的惊人的威力显示在它对 NGC 4258 星系的观测上（参看图 2-6），该星系位于约 2300 万光年远处，展示了存在河外的特大质量黑洞的迄今为止最绚丽夺目和令人信服的证据。天文学家应用甚大基线阵测量了 NGC 4258 核心水分子的速度，测定了有相当于 4000 万太阳质量的物质集中在半径小于半光年的范围之内，这是当今以最高可信度确定的宇宙中极高密度的物质。

99 今天，甚大阵和甚大基线阵的联合信号可以与轨道上的日本 HALCA（前沿通信和天文学高级实验室）卫星的信号结合，所得到的分辨率相当

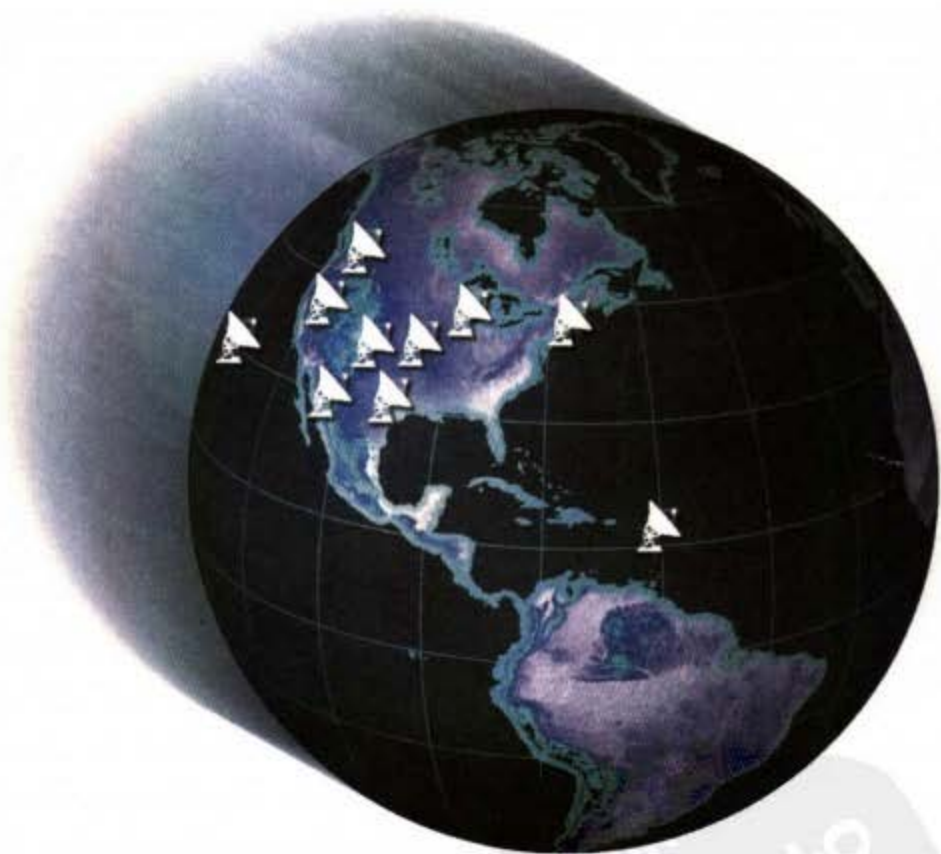


图 5-5 对于射电成像的分辨率的主要限制是天线的尺寸，若是干涉仪阵，则是组元天线之间的距离。最优秀的射电天文学家在地球上能做的事情是把一台台射电天线分布到地球表面，建立全球规模的基线。甚大基线阵由 10 台天线组成（每一台都像图 5-4 的甚大阵中的组元），横贯北美，从夏威夷群岛到维尔京群岛。整个设施由设于新墨西哥州索科罗的操作中心控制，与甚大阵一样，各单面天线的信号用电子技术结合起来，达到的整体效果相当于用一台 8000 千米口径的大天线进行观测的效果。甚大基线阵 1993 年开始运作（承蒙美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）

于之前只用地基望远镜得到的分辨率的3倍，由此得到的空间VLBI卫星系统的威力比哈勃空间望远镜强100倍。事实上，它的分辨精度相当于在洛杉矶的高处看清在东京的一颗米粒。

但是观测太空中的许多天体要求比这更高的分辨率，射电天文学界动员起来，要在最近的将来提供更大的能力。设于加利福尼亚州的喷气推进实验室的研究人员正在计划一个方案，称为地空高级射电干涉测量(ARISE)，可能于2008年实现。这个方案要求将两台25米的望远镜送到非常扁长的轨道上——以尽可能大地覆盖很宽的基线范围——模拟一个比地球大4倍的望远镜。它的分辨精度将帮助天文学家在仙女星系处看清只有10倍地球轨道那么大的天体。但是最扣人心弦的是它将“看清”环绕在银心的特大质量黑洞周围的吸积盘的结构。确实，具有这么高的分辨率，它有可能拍摄黑洞本身的像，因为黑洞的视界比这个未来设备能看清的最小区域还要大过两倍[关于这一激动人心的未来进展的综合讨论，参看Melia(2003)]。

来自特大质量黑洞的喷流

正是特大质量黑洞向星系际空间发射等离子体的思想，看来与我们关于它们的引力超越一切和不可抗拒的观念相左。毕竟单个粒子总是在与巨大质量天体的抗争中失利和屈服，最终葬送在后者的视界之内。不过当物质集中着向黑洞掉落的时候，天文学家常常看到随之而来的炽热气体的密集迸发，在寄主星系周围介质中形成狭长的漏斗形气穴。再则，这些高能流看来是显著的动力学影响的结果——它们不只是反指发射发生地以揭露元凶的无害幽灵。例如，天鹅座A里的威风凛凛的射电源(图1-8)的射电光辉，在更加惹人注目的X射线像面前却黯然失色，这张像显示了喷流对于本来平静的原始基质的破坏性的冲击(参看图5-6)。黑洞气体的喷发现象引发了天体物理学家们极大的热情，因为它产生了宇宙中最快速运动的等离子体。要弄明白为什么这种相对论性的加速竟然发生，是一个挑战。



图 5-6 钱德拉 X 射线天文台携带探测 X 射线而不是射电波的仪器，它拍摄的这张天鹅座 A 天区的壮丽图像，显示了不同于由甚大阵探测到的物理效应（参看图 1-8）。被中心黑洞抽运向外的相对论性粒子吹送稀薄而炽热的气体弥漫于星系际介质之间，源中的 X 射线主要是在这时产生的。这一情况非常类似于一只气球被内部膨胀的气体鼓胀。毫不奇怪，最亮的特征正是在两端的那些点，那里的喷流冲击在弥漫的气体上，形成如我们在射电像上看到的双瓣。赤道周围巨大的椭圆形泡形成的亮带非常显眼，提供了表明正有物质向中心黑洞旋动着掉落的某种证据（承蒙马里兰大学的 A. S. Silson 等和美国宇航局惠赐照片）

此外，当科学家看到宇宙中巨大的空穴被天鹅座 A 中高能喷射雕琢出来之际，他们不得不面对这个严肃的事实，即这个结构已维持了很长的时间，长到至少等于喷流中的粒子从星系中心运行到两个巨瓣顶端所需的时间。换句话说，这两个相对论性等离子体的铅笔状尖细的喷流保持它们原始状态的构形已超过 100 万年了！因此，物理学家现在持有的最保守的观点是有一个旋转黑洞潜藏在核心之中，这是不值得惊奇的。它的自转轴的作用就如一个稳定的方向舵、一只不动的陀螺仪，它的方向已先期决定了喷流的取向。没有人做出过不同的物理描述，说明这么一个巨大的稳

定的结构如何以其他方式维持。虽然关于喷射发生的确切机制还没有在细节上探究明白，但我们将在下面看到，现在日益增多的证据表明磁化等离子体在黑洞视界附近的绕转运动正是喷发的原因。描述惯性参考架环绕黑洞自转轴随动的克尔时空，为确定这种喷射过程的优先方向提供了自然的依据。

101 半人马座 A 更加接近我们（与天鹅座 A 距离我们 6 亿光年相比，它与我们的距离是 1100 万光年），不如天鹅座 A 威力强大，但在其他方面是相似的，例如都产生双物质喷流，以接近光速的速度喷射到难以想象的远距离之外。半人马座 A（参看图 1-6）毕竟还是太远，我们不能分清其核心内哪一部分暗物质是许多死亡的恒星还是单个天体，但是有迹象表明那里有一个特大质量黑洞，质量可能达银河系中心人马座 A* 的 100 倍，它是所有非恒星活动的根源（参看图 1-7）。除了我们在第 1 章里考虑的令人信服的论据以外，存在从这个星系核心发射的喷流——就像在天鹅座 A 产生的喷流——又是另一个十分难以解释的现象（参看图 5-7）。

天鹅座 A 星系在其整体范围内有几千亿颗恒星，它的射电功率是它们全部光线功率的 10 倍至 100 倍！当巨大的双瓣现身后，它们贡献了全部输出的大部分，不过高速粒子流的尾巴和与它们相关的场也能在射电图中看到，正是这些场给这些发光气体的宇宙“雾团”提供能量。人们早就认识到（从事这一领域某些开创性工作的有 Fred Hoyle、Geoffrey R. Burbidge 和他们的合作者，他们的论文发表在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初的 *Nature* 和 *Astrophysical Journal* 上），在地球上看到的射电波无疑是同步加速辐射¹，当（以接近光速运动的）高能电子在磁场中急速绕转时会发射光线，就产生了这种辐射。当这些粒子前后左右地加速旋转时，这些辐射根本就是从它们身上“撕裂”出去，好比你在旋转木马上越来越快地策马飞转时，你的帽子、围巾和其他没有系紧的服饰都会甩出一样。

但是就在起初，在某些射电像的中心有一些十分特殊之处。原来这些与特大质量黑洞符合的中心斑点往往太小，不可能从这里辐射出天文学家所探测到的全部无线电波。虽然理论上辐射能从这么小的区域产生，但是不能从高度密集的粒子中间逃逸。这个问题的解决，终于导致我们对喷流

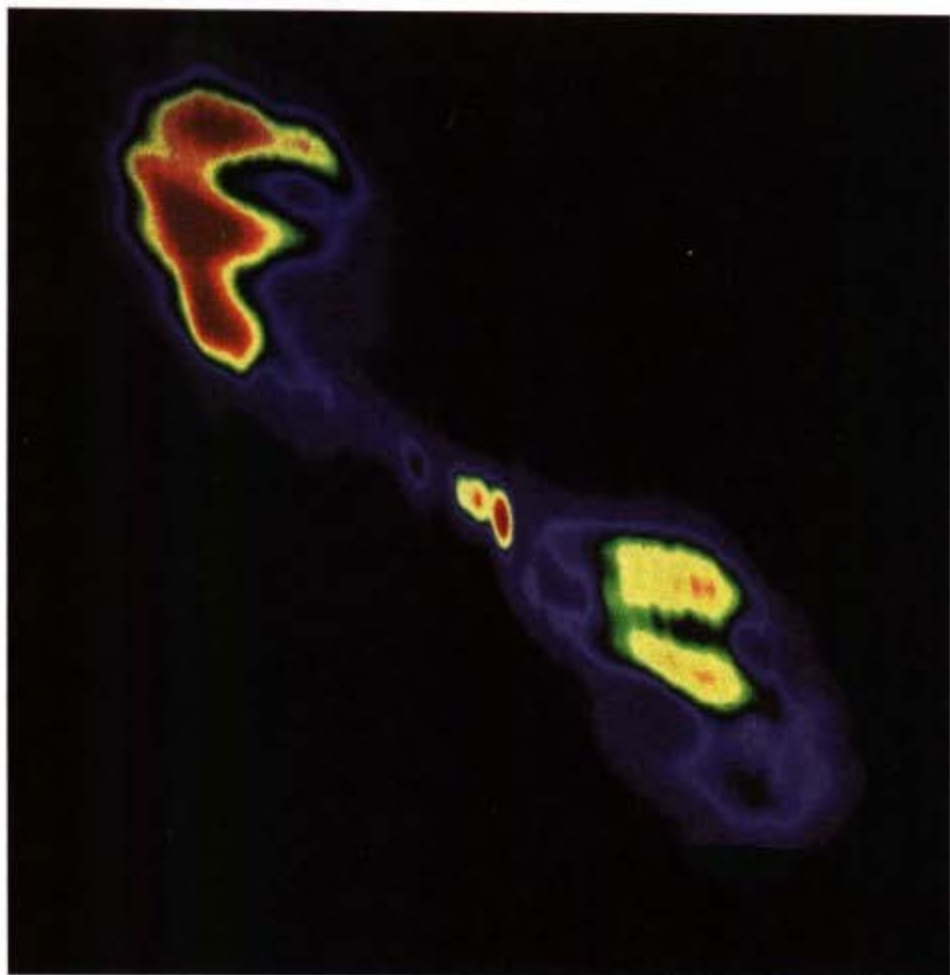


图 5-7 我们已在图 1-6 中首次看到了活动星系半人马座 A 的光学形象。它是在全波段（从射电波到 X 射线和 γ 射线）被频繁观测的目标。作为这类天体的原型，它是南天被最广泛研究的天体之一。这里显示的像由甚大阵在 2 厘米的波长上拍摄，展现的区域为图 1-6 的两倍，虽然望远镜的指向相同。喷流结构的中心与椭圆星系的中心重合，是已知的最小河外射电源，直径只有 10 光日。喷流在射电波段显示出来，高能粒子被 2 亿太阳质量的特大质量黑洞加速，从核心向外喷出，这些射电辐射是由它们发射的。这些相对论性粒子产生高能辐射，它在频谱的另一端描绘了喷流的轮廓（参看图 5-8）（承蒙 J. O. Burns、E. J. Schreier、E. D. Feigelson、美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）



图 5-8 钱德拉 X 射线天文台拍摄的半人马座 A 的 X 射线像，揭示了明亮的中心源——驻留着 2 亿太阳质量黑洞的活动星系核——和 200 多个别的点状 X 射线发射源，它们分布在星系里（参看图 1-6）。星系和它的喷流的这张壮丽的 X 射线图像基本上覆盖了图 5-7 中射电像的相同面积，不仅证实了与强烈地驱动相对论性等离子体有关的高能活动，而且也为科学家提供了一些惊人的发现。喷流的 X 射线轮廓与射电轮廓是十分不同的，前者比原先预期的要不稳定得多。这些结果表明从活动星系核喷射出来的高能粒子并不在整个结构内持续发光（承蒙 R. Kraft 等和美国宇航局、史密松天体物理台惠赐照片）

及其性状的了解取得了最早的突破。罗杰·布兰特福特 (Roger Blandford) 102 和马丁·里斯 (Martin Rees) 于 1978 年提出了假设, 认为炽热的、磁化的等离子体正在以极高的速度向地球运动。于是, 部分由于强烈的多普勒效应, 导致辐射的集束效应, 处于喷流锥内的任何观测者将比在锥外接收到显著提高的辐射强度。

这个解释成了一个范例, 说明多么小的核心就能够在如此广漠的宇宙内显得如此明亮。寄住着特大质量黑洞的类星体和最明亮的星系核正是这类喷射源, 它们的探照灯般的能量和光线的射束正对着我们。这个解释在揭示特别明亮然而细小的星系核的秘密上的成功, 也构成了关于喷流内的等离子体以极高速度运动的第一个证据——典型的速度达光速的 99.99%。

一旦甚大阵开始其对射电喷流的研究, 便为我们敞开了全新的和相关信息的闸门。该望远镜阵有足够的灵敏度, 能很快地探测到甚至是很微弱的喷流, 它也有能动的装置, 以便在出现难以分辨的背景光时进行这种观测, 而且它相当大, 足以把经常出现在等离子体流里的许多成分分离开。有射电辐射的各种类型的活动星系核都发射喷流, 其中许多例子已浮出水面, 能量传输到外面明亮瓣中去的途径已得到确认, 这证实了物理学家试图解释喷流现象而描绘的图景 [这一理论解释能追溯其根源早至 Morrison (1969) 的论文, 他试图以相对论性粒子束和能量来解释喷流, 还有 Rees (1971) 的论文, 他提出射电辐射的喷发是由低频的电磁射束提供能量。不久以后, Longair *et al.* (1973) 提出能量传输的时标“可与源的年龄相比拟”, Scheuer (1974) 做了射电源受相对论性射束供能的动力学研究]。

今天, 天体物理学家研究喷射涉及的两个主要课题——等离子体如何被黑洞排斥 (在下一节叙述) 和它们如何获得内部结构。最明亮的、细节清晰的漏斗形的射电像显示了很丰富的内部多样性: 结点、环、圈、纤维 103 和一些螺旋形的“线”。这些分布物的 X 射线像甚至显示出更复杂的形态。例如, 钱德拉 X 射线天文台最近对半人马座 A 喷流的观测 (参看图 5-8) 令人十分惊讶。等离子体漏斗的 X 射线和射电的结构显著不同, X 射线喷流比原先以为的要更加不规则得多。曾经有一些很简单的图像阐述高能粒子如何从活动星系里喷发而出并进入喷流, 而这些新结果对这些图

像提出了质疑。几乎可以肯定，一定会产生某种程度的不稳定性，因为大自然不会有心长时期地保持“完美的”条件。

无论如何，本书首先关注的是这些喷流就特大质量黑洞的性质说明了什么。现在天文学家已经认识到等离子体是以接近光速的速度向外排斥。不久以前，他们获得一些证据，表明这些呼啸着的气体的成分可能是物质与反物质的混合物——基本上是电子和正电子，它们互为反粒子——而不是由电离氢构成的普通物质 [这个推论的根据是观测到了 3C 279 这个类星体的偏振性质，参看布兰代斯大学的 Wardle *et al.* (1998)]。当无线电波在传播中通过前者时，与通过后者时相比，它们的性状是不同的。至少在一种情况下——被称为 3C 279 的类星体——这种差异是能测定的，物质和反物质的组成已有定论。科学家也知道，喷流已维持了几百万年以上，所以以爆炸事件作为它们被喷发的原因是可以排除的。最后，已知至少有 30 个个案中的喷流中的某些特征在天空中的运动快于光速。现在让我们看看，所有这些线索最终怎样融合为一个自圆其说的解释。

比光的运动更快

在所谓的超光速源²中 [参看 Zensus and Pearson (1987) 的综述]，一些粒子流以相对论性的速度从某些星系中心冲决而出，表现为在天空以
104 显著地大于光速的速度运行——这种现象当它首次被发现时自然引起了轰动。公众对发现这种视运动的反应是产生了普遍的怀疑情绪，促使某些人批判狭义相对论和宇宙学红移的观念 [关于这一争辩的讨论，请参看例如 Stubbs (1971)]。为了理解正在发生什么，并揭示关于喷流加速的最近观测告诉我们什么，让我们考察这类天体中最壮观的成员之一——被称为 M87 的椭圆星系 (参看图 5-9)。

银河系与仙女星系及其更小的伙伴和随从一起，在室女座星系团的外围绕转，那是一个包含几千个星系的巨大集团，其中 M87 是最大的一个。M87 于 1781 年被法国天文学家沙尔勒·梅西叶发现，它的光学喷流于 1918 年首次为立克天文台的黑伯·柯蒂斯 [Heber Curtis, 1872~1942。柯



图 5-9 巨椭圆星系 M87 是室女座星系团中心主宰一切的“金刚”，银河系只是松散地依附在一旁。M87 的直径为 50 万光年，距离地球 6000 万光年，在天空的张角超过半度——大于满月的直径。它的外层看来明显地反常，可能是由于它与室女座星系团其他成员的引力相互作用，还可能是由于在过去发生了星系的密近交会，有星系被 M87 摧毁并吞并，它包含着剩余物质。在星系的右下方，有一个我们刚刚能够辨清的物质喷流，这是 1918 年由立克天文台的 H·D·柯蒂斯发现的。这个相对论性粒子形成的铅笔状尖细的射束在其他波段显得更加清晰（参看图 5-10），它表现出明显的超光速运动，这一点根据它在接近视线的方向快速前进可以很好地理解（承蒙美国国立射电天文台、大学天文学研究协会、美国国家科学基金惠赐照片）

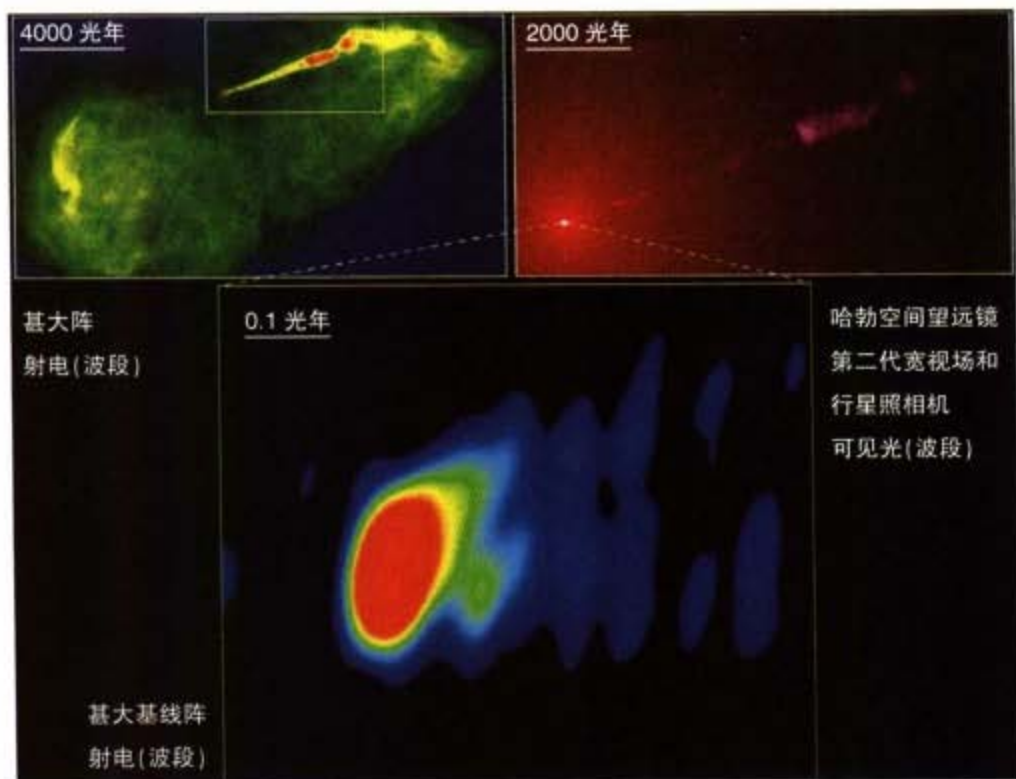


图 5-10 从 M87 核心延伸出的“光线”在 20 世纪初已被天文学家注意到了。从这个星系中心发出的光流就像宇宙的探照灯，是自然界最令人惊异的现象之一——一个由黑洞驱动的亚原子粒子的喷流以接近光速的速度疾行。这场盛大表演的源是一个强大的中心天体，它的质量达 30 亿太阳质量，比银河系中心的黑洞大 1000 倍。我们看到的光是电子围着喷流内的磁力线绕转时产生的，这个过程产生了像中右上角的蓝色。图中的照片是按将我们所看到的场景逐步放大的顺序排列的。左上：由甚大阵拍摄，显示充分展开的喷流和在端点上的斑点；右上：巨椭圆星系 M87 的可见光像，由美国宇航局的哈勃空间望远镜拍摄；下方：由甚大基线阵拍摄的黑洞周围区域的射电像。甚大基线阵是由 10 台射电望远镜组成的网络，应用甚长基线干涉测量检测源的精微的细节（参看图 5-4 和图 5-5）。这张激动人心的图像显示在十分之几光年的星系核内（红色区域只有 1/10 光年大小）星系际喷流如何形成了狭小的射束。这个距离相当于只有这种质量黑洞的 100 倍史瓦西半径！[承蒙美国国立射电天文台和美国国家科学基金（左上和下方）以及空间望远镜科学研究所的 J. Bretta 和美国宇航局（右上）惠赐照片]

蒂斯是著名的沙普利-柯蒂斯辩论中的主角之一，辩论的主题是宇宙究竟是由单个大星系构成的（沙普利一方）还是银河系只是许多星系中间较小的一个，而太阳位于银河系中心附近。正如我们在本书开头所见，关于这场辩论的部分解答在 20 世纪 20 年代揭晓，当时天文学家埃德温·哈勃成功地证明了仙女星系甚至比沙普利所认为的整个宇宙的大小更远。当然，星系本来比柯蒂斯心目中的更大得多，而且太阳在离中心很远处绕转，但是他关于宇宙有多星系结构的早期观念是正确的] 观测到，他把它描述为“一个奇特而笔直的射线”。事实上，M87 是从此引入了“喷流”这个术语的第一个河外天体。1954 年，巴德和闵可夫斯基（Minkowski）描述这一光学特征为“长期以来所知的唯一的特点……一条笔直的喷流在位置角 290° 方向从星系核延伸出来，比星云本身更蓝一些……有几段强烈的凝聚”。9 年以后，施米特（1963）在 3C 273 的射电成分的精确位置附近，证认出“一颗约 13 星等的恒星和一个暗淡的集束或喷流”，这是首次认定“喷流”也产生射电波。

在充分曝光的照相底片上，M87 的广度超过半度——比满月的直径还 105~106 大，它的距离是 6000 万光年，这意味着它的线宽度达大约 50 万光年。它的周边看来明显反常，表明它与室女座星系团的其他星系有明显的引力相互作用，还可能是不久前并合了较小恒星集团的结果。它占据着比银河系大得多的空间体积，包含着比我们星系更多的恒星（和大得多的质量），数量肯定达到几万亿颗。天鹅座 A 和半人马座 A 之所以被这样命名，是因为它们在各自的星座里是最亮的射电源，依据这种命名的惯例，射电天文学家把 M87 称为室女座 A。

M87 已经成为用于研究的首选天体之一，因为它是产生喷流的最近的一个天体，它的强烈的射电辐射使它成为射电望远镜的优良目标。它之所以还十分令人神往是因为其内部还潜藏着什么。天文学家重复了对天鹅座 A 开展的工作——在这项工作中，哈勃空间望远镜以传奇般的方式不仅证实了与位于其核心的特大质量黑洞有关的点源（参看图 1-7），还测定了它的质量——对 M87 的核心来说，现在已经证实在不大于我们太阳系的体积内集中了 30 亿太阳质量的暗物质（是银心的人马座 A* 的大约 1000

倍)。天文学家把目光集中于这个奇特的地方，并能用当代最高精度的射电测量，揭示离核心仅仅 $1/10$ 光年内——这是不大于特大质量黑洞直径 50 倍的大小（参看图 5-10）——发生的现象。他们确实见证了这些壮丽的喷流是如何在视界的景象之内形成的。

这个奠基性工作中更令人屏息关注的结果展示于图 5-10 的下方，这是由空间望远镜科学研究所和新墨西哥大学的天文学家小组用甚大基线阵所得出的（这个方案的设计者是位于马里兰州巴尔的摩的空间科学研究所的 John Biretta 和 Mario Livio 以及位于奥布科克的新墨西哥大学的 William Junor。他们的发现发表于 1999 年的 *Nature* 杂志）。这个特大质量黑洞的鲜明形象，加上它与类星体和其他活动星系相比离地球如此之近，给了科学家以无可比拟的机会去观测这个神秘的区域，那里亚原子质点的强烈喷流正在加速到接近光速。这些天文学家推测，喷流应在黑洞附近射出，而且应能看到某些表明活跃的机制正在起作用的证据，但是当他们的观测越来越趋近于中心，达到小于视界 50 倍的距离时，他们终于能不断看到已经形成的射束。

从图 5-10 下方高度清晰的、由甚大基线阵拍摄的像来看，M87 的喷流展示了它从发射点仅仅 1 光年的几分之一范围内的狭长形态。正是根据这个离黑洞只有百分之几光年的采样区域，研究人员能够肯定这个外溢喷流接近中心的部分相反则很宽阔。它的张角约达 60° ，远大于任何人的预计。换句话说，大家可能认为喷流宛若一个集中在黑洞上的相当狭窄的漏斗一样开始向外的旅程，与此相反，它看来是从更广阔的区域向上冒泡——无疑是从围绕中心的吸积盘上。显然，黑洞并不单独行动。

现在天体物理学家相信类星体喷流的许多方面可以理解为相对论性流的表现，由他们称为“B++”的机制发射出来——这就是一个黑洞（B）加（+）一个旋转的吸积盘加（+）一个冻结在这个盘上并被它的旋转缠绕起来的磁场。由于磁场的磁力线穿透等离子体，两者向黑洞的引力势阱越陷越深。下落的气体不仅被压缩——这同时又使磁力线的密度增加——而且当它越发接近中心天体时，它围绕中心天体的旋转也越来越快。磁力线被编成了辫子，而且越缠越紧，有些竟至断裂。带电粒子能像念珠似地沿

磁力线流动，但是不能穿越它们。从图 5-10 的下部我们看到，当转动的磁力线把这些丰富的带电粒子流向外和向上抛出时，它们正在离开吸积盘。这就部分地解释了为什么喷流呈现为在全路程上“已经形成”，直到甚大基线阵观测样本中的最小距离，因为等离子体据推测是从整个盘上被排斥出来，而不是正好从黑洞本身。

让我们回头去看，人们经常看到喷流在其经历上百万光年进入相当空旷的星系际空间的旅程中发生明显的进动，类星体喷流起源于吸积盘可能是其主要原因。除非黑洞是在双星系中（参看图 4-5），否则它应该是非常稳定的。然而，它的盘要轻得多，而且遭受着等离子体从外部向它的冲击，因此是很容易随时间摆动的。但是由于缠绕着的磁力线或多或少地垂直它的表面，喷流发射出去的方向本身就会产生进动，产生永恒不变的螺旋锥般的形状（参看图 5-11）。

深入到 M87 核心探测其内部活动的可能性，被天文学家认为是这类研究中的了不起的成就。但是对这种异常的星系感到惊奇的最佳理由，也许是靠近喷流基底的物质运动是分别由射电望远镜（主要是甚大基线阵）和哈勃空间望远镜独立测量的，而且它们都揭示了抛出的等离子体从特大质量黑洞出发以 6 倍的光速退行。事实上，类星体的这种情况正是在 20 世纪 60 年代和 70 年代提出需要用更高分辨率进行观测的原因，以便看清中心天体附近发生的事情。当时为了克服观测精度不足的缺陷，加拿大、美国、英国和前苏联的研究组联合起来，目标是发展甚长基线干涉测量（VLBI）技术。应用这项技术，一个全球性的由独立的射电望远镜组成的网络能够把它们各自的信号综合起来，从而能使天文学家看清射电源精微 109 的细节，这是用单面望远镜所办不到的。

超光速运动扑朔迷离，但并不是物质确实在以这样的速度传输。这是光速有限和恒定的表象。回溯到 1966 年，马丁·里斯提出，这些效应可能与以相对论性的速度膨胀的物质壳层有关。通过后来对这一基本假设进行改进，人们便明确了观测到有辐射的射电源是以相对论性运动的粒子流组成的类星体喷流 [参看 Blandford, McKee and Rees (1977)]。超光速效应被证明在狭义相对论的框架内也能很好地理解。



图 5-11 亮射电星系 3C 31 的核心把强烈的高能粒子流以非常接近光速的速度输送到周围的介质中去。圆锥形的喷流从中心经过令人难以置信的 100 万光年的距离展开成扭曲的羽状物。但是最扣人心弦的是“喷嘴”的视运动，它造成粒子流的突然转向，很明显地投影在这张像上。也许黑洞是在双星轨道上（如同图 4-5），或者吸积物质的盘周期性地重新排列（承蒙 R. Laing、A. Bridle、R. Perley、L. Feretti、G. Giovannini、P. Parma、美国国立射电天文台、大学联合公司和美国国家科学基金惠赐照片）

当一个光源向着我们运动时，一定会发生这样的事情，即它正在追着自己发出的辐射，所以我们实际所看到的变化似乎发生在更短暂的时间间隔之内。由于看来在极短的时间间隔内覆盖了相当大的距离，我们推断出的速度比物体实际具有的速度要大。天文学家现在已经理解，图 5-10 中表现超光速运动的喷流和与此类似的所有喷流，一定直接朝向我们。当我们注视用甚大基线阵拍摄的 M87 的像时，我们会清晰地看到投影在天空平面上的长长的喷流——这是对我们早先提出的“细小但是过分明亮的核”这个问题所做的有意义的补充观察，它的解答就是我们看到的喷流里面的发光气体，图中用方框围住。

让我们考虑下面的类比。假定萨姆和伊娃正隔着一道高高的篱笆玩接球游戏。萨姆能够看见投过篱笆的球，但是不能看到伊娃。伊娃告诉萨姆她将紧接着连续投出两个球，而萨姆要根据它们到达他手上的时间间隔，来算出她在投出它们时移动得多快。萨姆知道在两次投球之间，伊娃要跑上 10 米，但是他不知道的是她选择了正对着他跑过来。伊娃开始跑动，扔出第一个球，而要在跑过 10 米之后才扔出第二个球。因为她是在与第 110 一个球相同的运动方向上跑动，而且部分地追上了它，因此萨姆在接到第一个球到接到第二个球之间的时间间隔比伊娃在两次扔球之间实际等待的时间间隔要短。

因此，萨姆为伊娃推算出来的速度大于她能达到的速度，因为他以为她比实际所需更短的时间跑完了 10 米。当然，这只是在伊娃朝着萨姆跑动时才会发生。如果她平行于篱笆跑动，那么萨姆测量的时间间隔将与她实际经过的相同，于是他们对于她速度的计量就将一致。推而广之，天文学家推断表现超光速运动的类星体和活动星系核的喷流，一定是对直朝向我们。然而，如果从不同的角度由别的眼睛来观察这些等离子体束，未必会看到这些喷流有超光速运动的特征，而且由于它们的透视效应，这些喷流比从地球看去延伸得更远。

喷流是那么惊人又异常巨大，因此从 20 世纪 70 年代早期以来就自然地成了发现和识别特大质量黑洞的主要方法。相对论性等离子体束怎么能够产生并维持几百万年以上——也许数十亿年——而不受到寄主星系中央

那个质量巨大而又稳定的天体的影响，没有人对此做过成功的解释。就这样，喷流的出现至少是主要的形态特征，表明附近潜藏着巨无霸。特大质量黑洞的更加直接和可信的证认手段已经面世，在第2章里我们已描述过几种，而我们甚至已几乎可能实际“看到”银河系中心的视界。科学在全线阔步向前，我们在射电波段以外的各波段对宇宙的探索也都获得了可喜的发现。我们将在下一章考察这些成果。





6 宇宙中的特大质量黑洞

夜空，在满目繁星闪耀的光芒中，飘动着星系旋舞的翩跹身影。如果 111
视线没有偶然机会从这些密集光点间的空隙中间穿过，就不可能对远方宇宙进行深度的探测。在 1995 年 12 月，哈勃空间望远镜连续 10 天正好通过这样的间隙瞄准远方，观测到前所未见的宇宙深处，展现了鸿蒙初辟时几千个星系孕育而生的美妙景象。

哈勃深空探测

被称为“哈勃深空场”的像（图 6-1）不仅包含经典的旋涡星系和椭圆星系，也丰富地展现了各种形状和颜色的其他星系，这些星系暗示着支配早期宇宙演化的影响。其中某些天体可能是大爆炸之后的 10 亿年之内凝聚而成的。

哈勃深空场的景象只覆盖了满月直径的 $1/30$ 的小块天空（这里只展现了它的 $1/4$ ），它非常狭小，所以我们只能看到很少几颗银河系内的前景恒星。显示于这里的大部分天体都极其遥远，如果我们不借助于望远镜，肉眼的灵敏度必须提高 40 亿倍才能看到它们。但是即使这个视场只是整个天空的极小的样本，由于假定了宇宙在各个方向看上去都相同，因此天文学家认为它足以代表星系的典型分布。

这张美丽而令人难忘的图像还未显示的内容是，在许多闪光的恒星岛



图 6-1 美国宇航局的哈勃空间望远镜对准宇宙最遥远的幽深隐蔽之处，创制了这张可观测宇宙边缘的无与伦比的图像。这幅图像称为哈勃深空场（HDF），揭示了几百个前所未见的星系。除了经典的旋涡形和椭圆形的星系以外，它包含了具有各种形状和颜色、令人眼花缭乱的其他星系，它们蕴含着早期宇宙的结构。在这里看到的某些星系可能形成于大爆炸之后不足 10 亿年的时候。这幅图像显示了整幅哈勃深空场景观的大约 1/4，它被选来作深度曝光，是因为受到视线上银河系内前景恒星的“污染”很少——其中的一个是中心偏左、带有散射光芒的较明亮的天体。相反，这里看到的绝大部分天体是遥远的星系，其中某些远于 100 亿光年（承蒙 R. Williams、空间望远镜科学研究所的哈勃深空场研究组和美国宇航局惠赐照片）



岛之间隐藏着几百万个年轻、活跃的特大质量黑洞，它们已在天空舞台的其他场景里跃入我们的视野。这个透向天空的钥匙孔的开启，为地基射电天文学家提供了前所未有的时机，他们把射电望远镜阵列指向虽受附近天体干扰但未被遮挡的天区。与哈勃空间望远镜的光学观测不同，射电望远镜能够穿透黑暗的尘埃云，直达视场里星系的中心。欧洲的一些射电望远镜组成了欧洲甚长基线干涉测量网（EVN），设在荷兰德温格洛的甚长基线干涉测量联合研究所及其在全球的同行们把这个测量网中的9台射电望远镜接收到的信号综合起来，所得到的哈勃深空场的射电像比哈勃空间望远镜的像还要清晰3倍。[设于荷兰德温格洛的甚长基线干涉测量联合研究所的 Michael Garrett 和他的同事们综合了下列射电望远镜的射电信号：设置于德国艾菲尔堡的100米望远镜、设置于英国的76米洛威尔望远镜、设置于西班牙马德里附近的70米美国宇航局/深空网天线和设置于欧洲各地的其他6台大型射电望远镜。这些像的数据由高速磁带记录仪记录，然后由设置于美国新墨西哥州索科罗的美国国立射电天文台的超级计算机处理。这个综合系统相当于一个超灵敏的洲际尺度的巨型望远镜。关于这次观测的技术层面的讨论，请参看 Garrett *et al.* (2001)。]

112

高分辨率的像显示，在哈勃深空场内许多星系的中心都蕴含有大质量天体。研究人员对作为射电源的寄主星系的多样性感到惊奇，它们包括漩涡星系、椭圆星系和非常遥远而尘埃密布的星暴星系。更令人激动的是他们认识到许多射电源是很小的——广度小于600光年。这清楚地表明，射电辐射是由与特大质量黑洞相关的过程产生的，因此就支持了黑洞与宇宙早期的结构形成有关的理论。

钱德拉深空探测

可是威力巨大的哈勃空间望远镜和钱德拉X射线天文台以及几台地基光学和红外设备最近联合观测的骄人发现，甚至使上述成绩斐然的结果都黯然失色。对远方宇宙所进行的前所未有的最深层次的多波段观测，揭示了各种大小的黑洞统治了早期宇宙，而且它们表现的多样性超过了研究

113

人员的预期。钱德拉 X 射线天文台对哈勃深空场的观测结果示于图 6-2。图 6-1 的像相应于整个视场左下方的 1/4，钱德拉 X 射线天文台和哈勃空间望远镜都对这 1/4 个视场进行了观测。

由 2002 年诺贝尔物理学奖得主之一的里卡尔多·贾科尼 (Riccardo Giacconi) 领导的研究组所做的这项研究，报告了约 350 个特大质量黑洞呈现在他们巡视的天区。由此外推至整个天空，可知在早期宇宙分布着 2 亿个特大质量黑洞！这类天体在过去显然要比现在活跃得多。

另外一些天文学家对这项研究做了不同的、互补性的探索，他们不曾聚焦于他们能在一个天区发现的那么多的 X 射线源，而是用各种技术在较长的波段辨认活动星系核，研究它们的高能性质。由宾夕法尼亚州立大学的威廉·布兰特 (William Brandt) 及其合作者开展的一项联测，利用钱德拉 X 射线天文台的高 X 射线灵敏度，尽力研究由斯隆数字巡天所发现的可疑的特大质量黑洞。迄今为止，他们已经测定了在宇宙最初呈现结构的地方出现的近 60 个这类天体的 X 射线性质。根据最新资料，他们做出的一个最重要的早期结论是：早期的特大质量黑洞获取能量并长大的方式，在很大程度上与现在活跃于地球近旁的天体相同。

宇宙辉光

再则，这些几乎难以听清的 X 射线的喁喁细语只讲述了那些特殊的特大质量黑洞，它们的指向正好容易把它们的高能辐射传输到我们的探测器。它们的实际数量一定高于诸如哈勃空间望远镜和钱德拉 X 射线天文台这类最精密的仪器所能揭示的数值。确实，现在有日益增多的证据表明，许多——也许是大部分——宇宙中的特大质量黑洞是隐蔽在视野之外的。

天文学家曾经在许多年内，对弥漫于星系际之间的微弱的 X 射线背景的可能来源迷惑不解。与宇宙微弱波背景辐射是大爆炸的遗存不同，X 射线雾霾中的光子能量太高，不可能在宇宙早期产生。相反，这种辐射场表明有更近的起源，这个起源与全部这样的源有关，即它们全面的辐射输出实际上可能在宇宙内另外的一切事物中占主导地位。恒星和普通星系才不

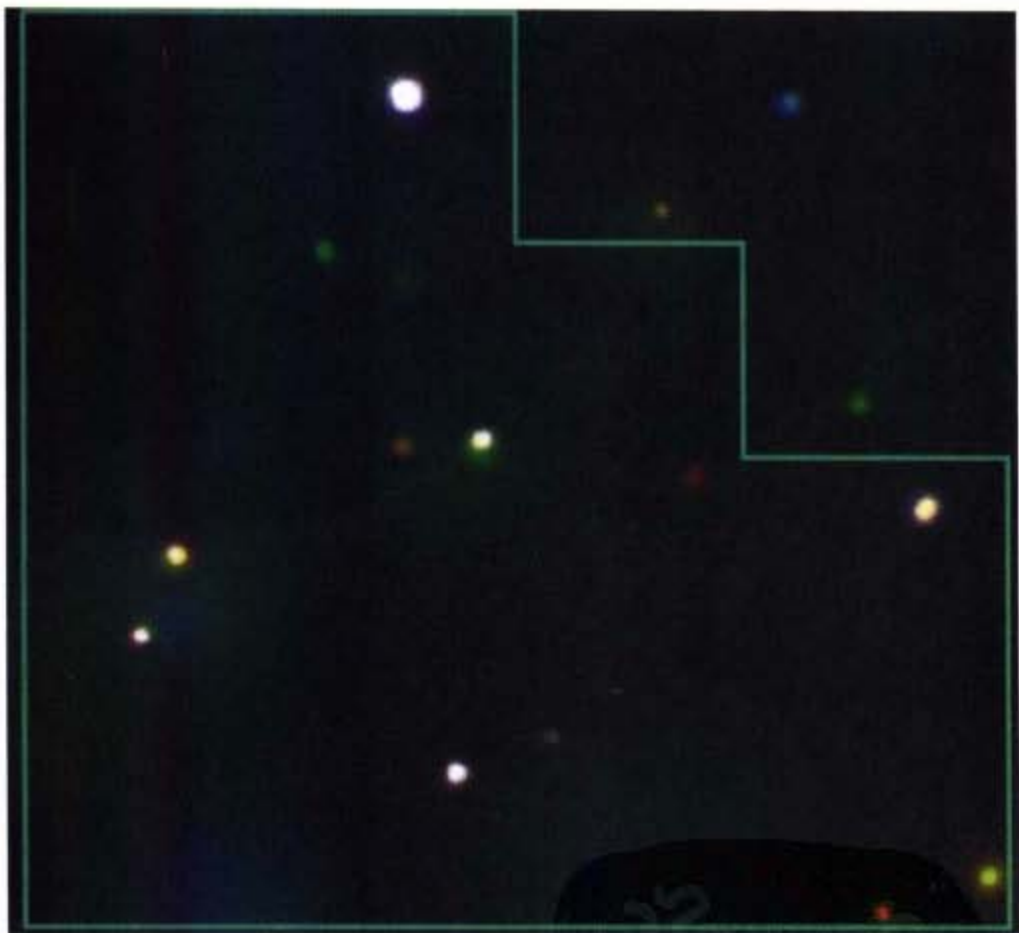


图 6-2 本图覆盖的也是哈勃深空场同一部分的天区（主要是以折线划出的左边这一块），我们已在图 6-1 中见过哈勃深空场的 1/4，不过本图是由钱德拉 X 射线天文台拍摄，是一幅假彩色像，显示了宇宙最远处的 X 射线的光辉。图中有 12 个 X 射线源特别明显。本图用不同色彩代表“X 射线颜色”，红色表示“冷”X 射线，而蓝色相应于“热”X 射线。这些源中大约有一半是由于趋向特大质量黑洞的吸积，其余是相当邻近的。除了趋向特大天体的吸积之外，这张图中还有超新星遗迹和中子星，它们也在林林总总的 X 射线源之中占有一席之地。钱德拉 X 射线天文台向相当远的宇宙深处探索，旨在探测与银河系这种星系发射的 X 射线类似、只是在时间上远远地往回追溯的 X 射线，以便了解我们的银河系及其近邻在大爆炸之后不久可能是什么样子（承蒙 G. Garmire、N. Brandt 等和美国宇航局、宾夕法尼亚州立大学惠赐照片）

会在这么高的能量上毫无节制地辐射，因此它们不符合上面提到的情况。

类星体自然位列其中，但是简单的普查表明，为了产生这类 X 射线的光芒，在每一个已知的类星体之外，还存在着 10 个黑暗的天体。这也就意味着，大多数通过吸积长大的特大质量黑洞不能被光学的、紫外的和近红外的望远镜观测到。

因此发现这些深藏不露的巨无霸的尝试就寄望于这种可能性，即它们的一些 X 射线的光子能够避开周围的羁绊而大量地逃逸出来，足以让我们以新的灵敏的仪器探测到它们。不论是来自向黑洞下落的等离子体的光学辐射还是紫外辐射，都被附近的气体 and 尘埃吸收，它们的高能 X 射线只是部分地衰减，展示了某些希望，即嵌于寄主星系中央炽热的、被遮蔽的巨大锅炉可能终于会忽隐忽现。

研究终于获得了回报。来自剑桥大学、德哈姆大学、伦敦大学和设于法国图卢兹的米迪-比利牛斯天文台的研究人员报告说，他们发现了一种称为 2 型类星体的天体。这个看上去不那么正常的星系的核心，不能用光学望远镜看到，但是 X 射线的微光暴露了它的特大质量住客，光线横越
115 60 亿光年的巨壑到达地球 [参看 Fabian, *et al.* (2000)]。这些科学家认为更多的类星体和它们的特大质量黑洞的强烈的源，可能隐藏在看上去不那么平常的星系里。但是，诸如安装在钱德拉 X 射线天文台上的灵敏的 X 射线探测器能够感知它们微弱的 X 射线的闪光，并揭示它们的真实身份——从不合适的角度看到的类星体。

来自哈佛-史密松天体物理台和俄亥俄州立大学的研究人员利用钱德拉 X 射线天文台，透过另外 10 个暗黑的疑似类星体的云遮雾障，揭示了相同的黑洞征兆——在 X 射线照射下发光的等离子体 [参看 Green, Aldcroft, Mathur, *et al.* (2001)]，从而完美地证实了这个结果。类星体和隐藏着的许多星系的核显然是同一现象，只是从不同的角度去看而已。迄今被发现的特大质量黑洞肯定只不过是众所周知的冰山一角。

所以，到处弥漫的 X 射线的雾霾，与发现被气体笼罩的类星体一起，现在共同指向特大质量黑洞，揭示自大爆炸以后宇宙产生的也许达一半的辐射，它们可能是背后的动因。普通恒星不再像在空间天文学问世之前多



少年间那样，独家垄断一切能量。

未来的方向

让我们放眼更远，对于特大质量黑洞的性质了解更多的前景确实是很
有希望的——既在不久的明天，又在长远的未来。有几项主要的措施将改
进在射电波段和 X 射线波段的成像和摄谱能力，此外 LISA（空间激光干
涉天线）将开启整个新的窗口，使我们有可能研究由于剧烈的引力相互作
用引起的时空结构的扭曲。正如我们已经看到的（参看第 4 章），LISA 预
期于 2010 年发射，它将宣告一个空间探测的光辉灿烂的新纪元，把我们
的探测前沿远远地推进到当前辐射能让我们看清的边界之外。通过探测远
距黑洞源发出的引力波，天文学家将能感知在难以想象的强大的引力场中
大质量天体的性状，检验广义相对论，甚至可能揭示理论的缺陷，暗示自
然界有待新的、更全面的理论描述。 116

将由 ARISE（空间和地面高级射电干涉测量；参看第 5 章）和更加精
良的地基毫米波阵开启的窗口将同样引人入胜，并将导致我们与自然的交
流产生深刻的改变。这两大进展——一个把射电干涉测量的基线延伸到空
间，另一个为在毫米波段的干涉测量开创世界范围的基线——是密切配合
的，旨在提高仪器的分辨能力，以便越来越深入地探测特大质量天体深不
可测的引力势阱。许多天体物理学家期望，附近黑洞的视界的像将在几年
之后就能问世 [参看例如 Falcke, Melia and Agol (2001), Bromley, Melia
and Liu (2001), and Melia (2003)]。

现有的射电望远镜，不论它们的规模如何给人深刻印象（参看图 5-4
和图 5-5），在较短的波长上还是无用武之地，由于结构上的局限性，它
们不足以提供纯粹的毫米波或亚毫米波的信号。所以，在这些波段上开展
世界规模的协调观测的主要问题，只是由于缺少适当的场所。

创建一个毫米波望远镜的全球网络的设想，实际上可追溯到 20 世纪
90 年代中期，它被称为 CMVA——这是协调毫米波甚长基线干涉测量阵
的英文首字母缩写。当时设于马萨诸塞州的海斯塔克天文台的人员制定了

一个创建网络、开展在 3 毫米波段的观测和在 1.3 毫米波段的实验性附加
117 观测的计划。从那时以来，CMVA 不断地突破新的技术水平，在逐渐缩短的波长上进行探测。迄今为止，全世界有 12 个台站参加到全球的 3 毫米波甚长基线干涉测量的定期观测，在 CMVA 范围内 1 年组织 12 次。虽然在某些台站有时因气候条件不利或产生技术问题而往往受到影响，但是这些联测总的来说是成功的，提供了致密辐射区域的良好观测结果，包括银河系中心。

然而在 1 毫米波段和 2 毫米波段，望远镜的数目远远地小于在 3 毫米波段的望远镜，这大大地制约了覆盖范围。幸亏这一情况迅速地改变了。例如，设置于图森附近格拉哈姆山的新的海因里希·赫兹望远镜近来首次加入了 1 毫米波段的甚长基线干涉测量实测。更加激动人心的是正在建造中的巨型望远镜——阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵（ALMA）——比任何其他方案更明确地传达了全世界天文学界日益高涨的热情。ALMA 设计为由 64 面可移动的天线组成的射电望远镜阵，每一面天线的直径为 12 米，分布于宽度为 14 千米的区域之内。在 2001 年上半年，欧洲、日本和北美代表在东京开会签署了一项决议，肯定了共同的意愿，与智利合作建造经营 ALMA，ALMA 将建造在智利阿塔卡马沙漠附近海拔高度 5000 米的安第斯高原，它被认为是在基础科学的历史上第一个真正的全球性计划。这架望远镜可望于 2010 年投入全面运作。

另一方面，X 射线天文学的研究工作必须完全在地球大气的屏蔽之外开展。钱德拉 X 射线天文台——美国宇航局最近的创新——开始让天文学家尝到甜头，看到以前所未有的空间分辨率拍摄的 X 射线像能揭示什么。设于马里兰州的戈达德飞行中心、设于纽约的哥伦比亚大学和设于帕萨迪
118 纳的加州理工学院的科学家和工程师们正在酝酿一项高能天文学的历史上最雄心勃勃的发展计划。这些研究人员汲取了地面光学望远镜演进过程中的经验，即制造多个协调运行的较小单元比建造单一的笨重设备更加高效而且容易，因此他们正在设计并将建造 X 星座天文台（参看图 6-3）。4 台分立的 X 射线望远镜一起工作，综合灵敏度将比过去或现有的任何一台 X 射线望远镜大 100 倍。



图 6-3 X 星座天文台计划，要求把几个在轨道上运行的相互十分接近的 X 射线卫星相结合。这些 X 射线卫星将协同工作，形成一台大望远镜的观测能力，足以使其在 1 小时内收集的资料大于现有的 X 射线望远镜几天或几周的工作量。4 台 X 射线卫星结合后的灵敏度比过去和现在的任何一个 X 射线卫星都高 100 倍。它们将能鉴别几千个微弱的 X 射线发射源，而不只是我们今天能见的一些光源。图中，远距离发光的 X 射线源是对半人马 A 形态的模拟像（参看图 1-6、图 5-7 和图 5-8）（承蒙美国宇航局惠赐图像）

美国宇航局当前正在计划中的任务是更富有想像力的，其目的不是别的，而是在 X 射线波段把邻近几个特大质量黑洞的视界切实拍成照片。美国宇航局与设于布尔德的科罗拉多大学合作，正在研发两台新的强大的美国宇航局望远镜，估计造价为 10 亿美元，预期于 2020 年前发射升空。这两台望远镜是微角秒 X 射线成像计划（简称 MAXIM）的一部分。这个

计划的主要部分是一个由 33 艘宇宙飞船组成的编队，每一艘宇宙飞船携带一台较小的望远镜。这么多分离的仪器分布在空间异常巨大的基线上，通过把它们搜集的数据结合起来，所达到的空间分辨率大于当前所能达到的约 100 万倍。如果有一架具有这么高的分辨能力的地面光学望远镜，我们就能去阅读月球表面上的报纸！

为了理解这项成就的来龙去脉，请注意位于 6 亿光年之遥的 M87（参看图 5-9 和图 5-10）核心处的 30 亿太阳质量的黑洞的视界，它投影在天幕上的直径只及 5 微角秒。MAXIM 所能达到的分辨率——即它能识别的各种特征的张角——是大约 1 微角秒，所以未来的 X 射线天文学家将能看清这个巨大的椭圆星系中心微光背景上的黑暗斑点。但是用 MAXIM 最容易拍摄到的是银河系中心的人马座 A*，它投影的黑斑的宽度超过 30 微角秒。

- 119 这项技术有其必须克服的困难（这项工作已由科罗拉多大学的 Webster Cash 和他的研究组，在设于阿拉巴马州的亨茨维尔的美国宇航局马绍尔空间飞行中心的合作下率先开展起来。他们把他们的设计发表于 2000 年 9 月 14 日出版的一期 *Nature* 上）。X 射线的波长只及可见光波长的约千分之一，这使得 X 射线望远镜非常难以制造。粗糙度很小、不致影响可见光的望远镜表面将很容易使 X 射线散射。此外，为了得到真正的焦点，要把十分精细地打造的双曲镜面与抛物镜面，按同轴的方式以非常精确的形状套接在一起，使 X 射线光子经它们作两次反射。相反，MAXIM 将应用类似于甚长基线干涉测量的方法，其中两台或更多的望远镜将结合起来，产生综合口径，相当于单台仪器之间的距离。MAXIM 研制组采用不同于制造昂贵镜面、使 X 射线精确地聚焦于探测器的方法，他们将使用现成的平面镜混合光子，产生更加清晰的像，类似于声波结合的方式——或者相互抵销（造成无声状态），或者波峰彼此叠加而加强。

现在的理念是让较小的望远镜均匀分布在圆形的轨道上绕行，轨道直径的变化在 1~10 千米，而它们又整体上在环绕太阳的轨道上运行。它们将从那里收集 X 射线的射束，并把它们输送到安装在轂盖处的更大的望远镜上去，然后再把累积的数据传输到几百万千米之外的地球上去。



宇宙本身是一个大黑洞吗

黑洞研究的领域显然已进入了振兴的时期，一波接一波的激动人心的发现合乎规律地创造出前沿的成果，而且未来的成就将引导我们到达当前的物理定律有效性的边缘。特大质量黑洞不再是过去几十年里所认为的怪物，而将是在合理地描述宇宙结构时必不可少的因素。某些天文学家由它的基本作用引出了相当大胆的结论，他们怀疑实际上我们自己是否就生活在所有黑洞中最大的一个——即宇宙本身的里面。是的，这个问题提得不伦不类，不过正如我们马上就会看到的，它的确促使人们对于原因和效果以及对于万物的起源作某些妙趣横生的深入思考。 120

一个黑洞是封闭时空的包裹，包藏在一个更大的空间（和时间）内，它可以包含物质、辐射，也可能还有其他黑洞。另一方面，就我们所知，宇宙是包罗万象的，所以在我们看来它就像一个黑洞，这样就必须假设存在在一个不可探测的——可能永远不可探测的——多维空间，我们的宇宙正隐藏在其中。

对于这一论点给予科学的支持的主要困难是，物理学家还没有关于在大爆炸的瞬间统一自然界所有基本力的完整理论。他们能以某种精确性说出 10^{-43} 秒之后发生的事情以及此后任何时间发生的事情，但是那飞逝的最初瞬间只是哲学和美学的交界处，而不是科学上可以严格证明的定论。例如，没有可能把当前的理论与早期宇宙的实际联系起来。这就是说，我们不能简单地“构筑”另一个宇宙，所以接受或者拒绝我们的理论建树，主要是根据纯粹的推理或者后来有力的预测。

大爆炸理论中最模棱两可但令人着迷的方面是宇宙的开端——宇宙膨胀开始时的奇点。一种任意高密度的初始状态，看来是不可避免的，正如灾难性的引力坍缩显然把掉进引力无底深渊中的物质挤压进零体积中去。原则上，理解了引力收缩的过程，可能解开遥远过去的神秘面纱，也可能沿着这条道路揭示新的物理定律。

再说，与宇宙是一个黑洞的问题有关的某些论点已经可以容纳进当前

- 121 的框架。“宇宙是否就在其引力半径之内，即在其自己的视界之内？”“在当前的宇宙中时间趋向于零时会发生什么？我们是否应该倒拨时钟？”诸如此类的问题至少能够以符合已经认识和经过检验的科学原理的语言开始讨论。

如果你听说黑洞内物质的平均密度未必是异乎寻常地大，也许会觉得惊奇。它的值严格地取决于这个物体有多大。问题很简单，只在于在一给定的半径内得到足够多的物质以便在此半径之内产生视界。让我们回顾第3章的内容，史瓦西半径是 $2GM/c^2$ ，所以事实上黑洞的大小直接正比于它的总质量 M 。但是对于一给定的 M 值，其密度与包围的体积成反比，而体积与半径的立方成正比。这样，质量巨大的黑洞实际上密度显著地低于其较轻的兄弟。例如 100 千克体重的一个人突然收缩成为黑洞，它的半径将不大于 10^{-23} 厘米，但是它的密度将升高到 10^{23} 克每立方厘米这么一个异乎寻常的值。如果太阳压缩成为一个黑洞，其半径为 3 千米，而密度将只有 10^{16} 克每立方厘米。

现在让我们考虑如果进一步增加质量——把质量增加到活动星系核内典型的特大质量黑洞——将会发生什么事情。对于 1 亿太阳质量的天体，史瓦西半径增加到 2.4 亿千米——大致是火星绕太阳轨道的大小。但是它的平均密度难以置信地小，大约是 1 克每立方厘米——竟只是水的密度！

- 空间极端巨大的区域，例如宇宙，并没有密密麻麻地充塞着物质以产生弯曲的光线路径，或者甚至把时空埋葬在它本身里边以形成一个视界。根据我们从“内部”所看到的宇宙，人们如何才能断定它是大于黑洞的密度还是没有？部分答案实际上要回溯到艾萨克·牛顿爵士的工作，他为了描述月亮环绕地球的运动，用刚刚发明的微积分去证明他的十分
122 重要的万有引力定律。他证明了一个球对称物体的外部引力场的作用犹如全部质量集中在它的中心。换句话说，如果在地球中心所在的位置，地球的质量集中在只有苹果大小的体积之内，那么月亮感受到的引力影响与实际状况一样。

1923 年，就在广义相对论发表后不久，乔治·伯克霍夫（George Birkhoff, 1884~1944）做出了一个惊人的发现，说明牛顿定律只要做一些



合适的修正，就算是对引力作更复杂的描述也能成立。他证明，如果一个球形对称的物体快速地坍缩或膨胀，在真空的空间中，史瓦西度规描述的引力场也不随时间改变。换句话说，在一个球形对称物体之外的引力效应并不取决于这个物体有多大——它只根据有多少质量包含于它的表面之内。

伯克霍夫定律看来是特殊的，因为根据广义相对论，一个非静态的物体通常会辐射引力波。我们现在知道，从一个看起来在各个方向相同的物体，事实上没有引力辐射能够到真空的空间中去，这不同于如图 4-5 所示的一对相互绕转的黑洞。它的结果能够以同等的有效性应用于在一个球对称（尽管未必静止）物体中心的球形空穴内部。然而，这里在空穴内的任何点没有包含物质，所以根据他的定律，在它们的内部的任何一处就没有引力场。

伯克霍夫工作的价值在于，在均匀性的假设下，我们能够计算宇宙中任何一处相对于相距为 d 的另外一点的引力场——只需简单地估计多少质量包含在半径为 d 、中心为另一点的球形对称的体积中。由于情况特殊，让我们设身处地地来考察，我们需要走得多远才能命中宇宙的视界。

根据哈勃在 20 世纪 20 年代至 30 年代关于宇宙膨胀的发现，远方的天体正在以与它们的距离成正比的速度退行。原来在大约 120 亿光年的远方的天体的退行速度接近于光速，我们与宇宙的这一部分通过以光速传输的影响而相互作用，因此这一距离一定是宇宙这一部分的半径（两个特殊的例子是电磁波与引力波）。这就是天文学家所称的可观测宇宙的大小。

伯克霍夫定律告诉我们，为了产生 120 亿光年的视界，所需的内部平均密度只是大约 5×10^{-30} 克每立方厘米——这是一个难以置信地小的数值，相当于在每立方米内只有 6 个氢原子。即使这样，这个值也超过了当前天文学家所做的最佳估值的 3~5 倍，究竟多少与哪份报纸向你通报有关。用来解释宇宙的加速的暗能量是否能够产生这个差异（参看第 3 章）？如果没有暗能量，可观测宇宙不可能是严格意义上的黑洞，尽管它可能出人意料地是封闭的。让我们对此想一想。在宇宙可能具有的一切平均密度之中，为什么就是这个值如此惊人地接近于为产生一个可观测宇宙的边缘的

视界所必需的值？

也许答案在于这一讨论中迄今为止我们所忽略的另一个重要的需要考虑的事情。根据现在的宇宙学模型，宇宙膨胀并不是由于物质在空间的运动所驱动，而是空间本身的伸展。这绝非无稽之谈，因为正是暴胀学说严格地依赖于空间膨胀的可靠性，而如果没有暴胀（参看第3章），大爆炸模型中的许多基本问题将不能解决。然而，空间的膨胀能够比光速进行得更快。狭义相对论的假设并不适用于这一现象，因为它只用来说明通过空间传输的最大速度是什么，而那是光速。所以，即使我们不可能看到在120亿光年的可见限度之外宇宙的“其余部分”，无论如何它也可能存在于那里并与我们的可观测宇宙同步地膨胀。

那么我们能不能延伸伯克霍夫球的半径并让它超越“可见的”限度而与视界相交？嘿，这可不行。一方面，如果这个区域是在宇宙的可见边缘之外，那么我们将永远探测不到，而那里也不能感知我们。引力的影响也不能以快于光的速度传输，所以不论有何种质量在那里，也永远不能与我们观测到的宇宙交流，它们绝不能试图施加它们的影响并产生普通的视界。

无论如何，对于“宇宙本身是一个大黑洞吗”这一问题能够给出一个有根据的“肯定”的回答，因为在2000年一个国际天文学家研究组通过BOOMERanG（河外毫米波辐射和地磁气球观测）实测完成了几次的确鼓舞人心的观测。我们已经在第4章领略了这些发现的意义，但是现在让我们在当前主题的范围回来回顾这些发现。

BOOMERanG实测所采用的气球上有一套灵敏的、名为BOOMERanG的微波探测器，其设计的目的是以前所未有的精度研究宇宙微波背景辐射，在气球飞越南极的10天之内，以 0.25° 的角分辨率对2.5%的天空作巡天观测。压力变化曾经在整个新生的宇宙内传播，导致了背景辐射上的涨落（参看图4-1），这台微波探测器用来测量这种涨落。估计在大爆炸之后30万年，这些变化发生的频次达到高峰，那时物质与辐射已停止了通过光子散射的相互作用。早些时候的计算表明宇宙当前的密度为 5×10^{-30} 克每立方厘米，会产生特征角分离度为 0.75° 的涨落，这完全在BOOMERanG微波



探测器的分辨能力之内。

实施这项研究的天文学家研究组是由罗马大学的保罗·德·贝尔纳尔迪斯 (Paolo de Bernardis) 和加州理工学院的安德烈·兰日 (Andrew Lange) 领导的，他们报告说 BOOMERanG 微波探测器不仅证实了涨落的最初起源，也清晰而确切地证认了发生的高峰与预期的位置相符。峰值所在的位置说明宇宙内的物质密度是在测定的统计误差的范围之内，而误差只是它的临界值的 10%。 125

物理学家已经知道可见物质、暗物质和辐射的结合密度只及所要求的 5×10^{-30} 克每立方厘米的约 1/3，所以其余部分一定是由宇宙膨胀的加速推演出来的“暗能量”。虽然关于这一现象的证据还是相当不明确的 [参看 Brian P. Schmidt *et al.* (1998) 和 Saul Perlmutter *et al.* (1999)]，宇宙学家发现，与由 BOOMERanG 微波探测器提供的完全独立的测量相印证，则是相当令人满意的，他们现在能够描绘一幅自洽的图像。宇宙显然是在暗能量主导之下，不过主导的方式是造成宇宙的总质量密度为 5×10^{-30} 克每立方厘米。看来宇宙有一个半径为 120 亿光年的视界，正好位于膨胀速度还未超过光速而我们能够看到的边缘。

然而宇宙直到今天没有明显的奇异性——它的质量散布在各处。那么大爆炸是否只不过是宇宙的初始坍缩（趋近于一个点）并随之向外反弹？是的，这是可能的，但是我们绝不可能确切知道，因为膨胀之初的 10^{-43} 秒以当前的科学方法是完全不可解读的。让我们把钟倒拨回去，看看以我们现有的知识在向这一始元前进时能走得有多远，而且为什么这个称为普朗克时期的 10^{-43} 秒的间隔看来不能突破。

由现代物理定律能够探测的这个最短的时间间隔，通过 3 个所谓的自然界基本常数限制了它们的应用范围。它们是标志引力强度的量的测定值、光速和量子力学中的模糊度。物理学家立足于没有反证而假定这些量不随时间改变。 126

量子力学证明，我们绝不能完全确定一个粒子的位置或者它的能量，因为即使我们想要知道它的存在，也必须干扰它才能感知它在那里。这样，就总是有某种位置上的不确定性，能量和时间上的不精确性，从而对

于粒子物理性状的任何描述必然掺杂着某种最低限度的“模糊度”。在我们的日常生活中，我们能够驰骋于精确性的想象中，只是因为由这些不确定性引入的模糊度非常微小，而我们内心又依恋外部世界表面上的清晰性，以为事物实际存在的方式就是这么方便和简明。毋庸置疑，在宏观的尺度上，这种模糊度丝毫显示不出来，我们用确定的位置和时间来描述自然界，非常适合于我们解释周围种种活动的需要。但是在微观尺度上，这个模糊度是至关重要的，如果排除这个隐含的不精确性，什么过程都不可能发生。

粒子位置的不确定性由普朗克常数 h 所决定。普朗克长度——我们能够探测的最短距离——取决于在这一尺度上引力作用的强度如何。而这又是由牛顿万有引力定律中的引力常数 G 反映的。这个耦合常数越大，两个给定质量间的引力就越强。于是普朗克时间就是通过这段距离交流信息所需的时间，这里传输的最大视速率就是光速 c 。这两个常数一起产生了最短的物理时间 $(Gh/c^5)^{1/2}$ （它近似等于 10^{-43} 秒），这是任何人（或任何事物）都能体验到的。

然而，宇宙学家一开始就有一定的信心描述从 10^{-43} 秒往后宇宙的膨胀。正是在这里量子物理学有了意义，因为正是在这一水平上，由广义相对论引出的史瓦西半径首次与量子模糊度所允许的最小尺度相等，它大致
127 等于 10^{-33} 厘米，还是比原子核远小得多。但是这里还存在模棱两可，因为物理学家关于如何对宇宙在这一点上做最佳描述存在分歧。他们还不知道是否有超量的维数存在（参看第3章），或者弦理论是否正确。有一种观点认为在普朗克时期（这时宇宙年龄是 10^{-43} 秒），对宇宙的最佳描述是10个空间维数的量子“泡沫”（包含普朗克长度大小的黑洞）连续不断地产生并湮灭，毫无原因也不产生影响。后一种情况的理由是在量子尺度上，粒子的产生不受能量守恒的制约，只要它们转瞬即逝，快得在普朗克常数描述的不确定度之内。

我们的物理学在普朗克时期附近还不完善的一个原因与等级问题有关，我们曾在第3章讨论过它。科学还没有能力描述自然界的力如何在这一时期统一¹。那时，到处是一片极高的能量和温度，自然界的力应该



是对称的，这意味着它们彼此集合，并获得了相似的强度——它们应统一成单一的一种。物理学家锲而不舍地追求着梦寐以求的目标，即 4 种力的大统一，并已取得了一些可观的成就。在 20 世纪下半叶，弱作用力和电磁作用力产生的相互作用已被纳入单一的现象，称为电弱作用力²，谢尔顿·格拉肖 (Sheldon Glashow)、斯蒂文·温伯格 (Steven Weinberg) 和阿布都斯·萨拉姆 (Abdus Salam) 完成了这一工作，他们因此荣获 1979 年诺贝尔物理学奖。

弱作用力以称为 W 粒子和 Z 粒子的很重的粒子为媒介，它们在原子核内当中子跃迁为质子时起作用，而电磁作用力为荷电粒子（例如电子和质子之间）提供相互作用。1983 年被发现之际，W 粒子和 Z 粒子是已知的粒子中最重的——每个的质量几乎是质子的 90 倍，然而光子——电磁力的携带者却是无质量的。这两种作用力的统一发生于物理过程中的能量极高之际，以致这两类力的携带者之间的巨大的质量差异已无关紧要。在宇宙的早期，情况正是这样，后来环境温度下降到约 10^{15} 开之下，随之质量差导致粒子相互作用的速率分化，由此产生了两种独立的作用力的表象。 128

现在正在进行统一强作用力和电弱作用力的尝试，这个过程称为大统一，但是这更具有挑战性，部分原因是要求把某些粒子，例如电子，转换成完全不同类型的实体，它们称为夸克。如果可能完成这个大统一，将在宇宙早期温度下降到 10^{27} 开以下时（这是非常接近普朗克时期的时候），导致相互作用的速率分化。

电弱作用力、强作用力和引力的最终统一，远远地超出了地面实验研究的范围，因为为了达到必需规模的相互作用所要求的能量简直是不可企及的。这看来有些特殊，但是更多地了解早期宇宙，对于粒子物理学这一分支不断取得进展并“完全”理解什么支配粒子的本质和性状而言是必需的。

当宇宙学家在日益接近普朗克尺度的方向上殚精竭虑地工作时，这些未知数对他们的观点正产生着日益强烈的冲击。探索的终点是——看来尚不确定—— 10^{-43} 秒。只有发展出一种全新的、贯穿始终的对自然界的描

述，并且它能避免量子力学的模糊度，才能改变这一情况。不过，物理学家是相当聪明的，所以希望总是有的。宇宙本身是不是一个黑洞？现在的答案看来是肯定的，但是它是如何又为何成为一个黑洞，还是大自然蕴含的最深刻的奥秘。

终极命运

在大爆炸最初所发生的事情是难以确定的，但是宇宙如何展示自己的问题可能还是比较容易面对，虽然尽管真相总要经过人类感知和理解的折射才能展现出来。如果把这个预言看做一成不变或者以为无懈可击，那完全是不知深浅和自欺欺人。相反，这是一种不断完善的学说，看来会被粒子物理学和天文学今后的许多进展和发现所动摇。

当前，这场演出里3个领衔的主角是可观测宇宙内包含的总质量、大统一理论（GUT，它将为所有已知作用力的完全统一奠定基础）和霍金辐射。直到有一天，原始物质——主要是氢和其他轻元素——的库存完全耗尽，恒星还将继续形成，星系还将碰撞并长大。然而，展望将来，物质将最终分离为各种几乎终极的状态，其中有熄灭中的恒星余烬、白矮星和中子星、小行星和行星以及弥漫于全宇宙的稀薄的气体。但是，不论生命最终的形态如何，就我们所知，生命是不可能永远存活的。没有从核燃烧释放的能量，维持生命的环境无所依存。同时，特大质量黑洞将继续生长，大团大团的气体在其不可抗拒的引力的拖曳下并入黑洞的质量，葬送在数量日益增多的视界之内。

生物无疑将显著地进化并存活很久，超乎我们的想象。在没有核合成的情况下，我们的后代甚至可能寻找新的能源，利用黑洞吸积释放的能量以保持他们的生存。但是大统一理论预言的某些过程将剧烈而不可逆转地改变宇宙，使得所有这一类的尝试在很长时期内成为枉费心机。在这些理论里，各类粒子能够（而且一定）突变为其他实体，这个过程可能通过碰撞或自发衰变而发生。例如，一个质子最终分裂为一个正电子（电子的反粒子）和一个 π 介子，后者是帮助传递核力的粒子。我们已经知道中子



是不稳定的，在几分钟的间隔内，它们便衰变为质子（这个过程是通过弱作用力进行的），所以它们最终也必然会分裂成次级组元。大统一理论允许——不，而是要求——这种转化，将注定原子核里两个重要的组元从物质成分表内永远消失。金刚石不是永恒的！

物理学家还不知道传递统一的作用力的几种粒子的质量，所以质子和中子衰变的时间还不肯定。当前的最佳估计认为质子的预期寿命可能在 $10^{37} \sim 10^{41}$ 年 [关于相关参数和其他考虑的充分讨论可参看 Adams and Laughlin (1997)]。

在那个时期，星系在宇宙膨胀的作用下继续彼此分离，它们的碰撞（参看第4章）已成了遥远的历史。因此特大质量黑洞终有一天会停止长大，因为它们已经把周围有限的物质补充吸收殆尽。估计这些天体的最终质量将为 10 亿~100 亿太阳质量。

那个时期的宇宙对于现在生活着的有感觉力的生物来说，是完全不可辨认的了，因为它已变异成连生命本身都不能在其中存活的状态。物理学家最多能讲宇宙将成为飘荡着基本粒子（诸如电子、正电子、中微子和高度红移的光子）的极度稀薄的暗黑的纱雾。还会有很少一些原子留存下来，但是当它们的组元质子和中子裂解后，也将最终消失。10 亿太阳质量的黑洞在这个实际上一无所有的无边的大海里漫无目标地漂浮着，自由地漫游于几近永恒的渊薮中，偶尔吞食几口不知在何处遇到的罕有的食物。

显然，特大质量黑洞在宇宙的早期历史中已经出现，并将存在久远——非常久远。在 $10^{32} \sim 10^{41}$ 年之后，它们将是宇宙中仅存的任何有意义的结构的孑遗。但是看来在宇宙舞台的最后一幕中，连它们也不能永久存在。黑洞一旦停止生长，就会开始通过一个孔洞慢慢收缩。这是应用量子力学得出的结论，这个理论虽然还不完整，但确信是正确的。广义相对论是一个经典理论，它在精确测量如距离和时间等物理量的基础上成立。只要我们能够精确地为视界定位并完美地测定其周围粒子的位置，那么视界的定义就是有意义的。但是量子力学中的模糊度要求位置有一定的不确定性，或者能量和时间上的不精确性。因此，物理学家对视界能精确定位并

固守其界的思想不以为然，因为这些观念完全无视量子力学关于最小尺度上的不确定性。

1974年由斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)发现的现象，可能是最终解决这一问题的第一步[想要更多了解关于这一现象的专业知识和黑洞蒸发的一般知识的读者，可以参看下列文献中的讨论：Thorne, Price, and MacDonald (1986)。也可参看Wald (1984)]。量子力学这个名词本身，揭示物理描述本质上涉及微观尺度。它告诉我们，在这个尺度上所有可测量的实体都被认为是由“某种”细微的粒子(即量子)束组成的，就光来说它们就称为光子。人们说到在场里，例如在引力场里的涨落，用适当的术语来说，就是与这类量子的性状有关，它们能够在涨落增大或下降时出现或消失。这些粒子束与模糊度之间的联系就是它们的大小、能量和寿命与不精确性的尺度(也就是与位置或能量测量的模糊性究竟多大)直接有关。

像光子这类量子只要有适当的能源在附近，便能从真空中自发地连串产生。但是我们从对这类场的性状的观测发现一个关键的事实，就是当这类粒子束发生自发的物质化时，总是成对地呈现，恰如为了产生涨落，某些东西必定要分裂开来一样。所以，一个量子，也就是粒子，如果具有负电荷，那么只有同时产生正电荷的对应体时，它才可能实现物质化。如果我们赋予某种粒子一定的性质，必须相匹配地给相应粒子以相反的属性。明确了这一点以后，那么谈到粒子与反粒子，或者物质与反物质才有意义。

霍金所发现的现象(霍金关于这一主题的某些讨论发表于1974年*Nature*杂志的一篇论文)，直接与黑洞的引力场中涨落引起的真空中量子化粒子的创生有关。以这种方式创生的粒子的寿命极其短暂，随即与它的反粒子一起湮灭，在涨落消退之后恢复真空。然而，我们注意到黑洞引力场的涨落具有与黑洞大小相当的波长。所以，当这些涨落表现为光子或者任何其他类型的、静止质量与涨落的幅度相比很小的粒子，那么它们的波长也相应于黑洞的大小。因此，质量很大的黑洞视界外围产生的稍纵即逝的量子与在较轻的黑洞视界周围产生的量子相比，要更趋向红端，因此能量也较低。



以这种方式产生的量子对在视界之外的湮灭极其迅速（大约在一百亿亿分之一秒）。但是霍金曾经证明，某些粒子对中的一个成员会掉入一去不返的膜内，而把它的伙伴遗弃在外界宇宙。这个遭到遗弃的粒子，没有了对手与它湮灭，便逃离黑洞的作用球，加入到奔向无限远的向外辐射的洪流之中。对于地球上的观测者来说，看起来这就像黑洞正在进行辐射，虽然机制显然是间接的。不过，这些逃逸粒子的能量来源终究是黑洞本身，133 虽然我们不能宣称辐射起源于视界之内，但是能量肯定来自于其内，因此，黑洞付出了质量损失的代价。如果说量子力学这一简单的应用能够经受时间的考验，那么看来所有黑洞终将蒸发。

一个质量大约是 30 个太阳的黑洞的霍金辐射的波长极长，因此非常微弱，这样一个天体要花 10^{61} 倍于宇宙当前年龄的时间才能蒸发殆尽。但是在 10^{98} 年之后，甚至 1000 亿太阳质量的巨兽也将消逝，彻底而永远地消逝——宇宙舞台上告别的一幕。这就是关于宇宙中最强有力天体的传奇性结局——只能在死寂的沉沉黑暗中期待来世。



译 注

序 言

- 1 广义相对论的4次验证。1916年爱因斯坦发表了划时代的论文《广义相对论的基础》。广义相对论实质上是一种与经典的牛顿引力理论完全不同的新引力理论。由于天体之间的引力作用占主导地位，其效应相对于地面实验室内远为显著得多，因此广义相对论的验证主要通过天文观测来实现。20世纪10年代至70年代，著名的4次天文验证是：行星近日点的异常进动、光线在引力场中的偏转、光线的引力红移和电磁波传播的引力延迟。现分述如下：

(1) 行星近日点的异常进动。水星绕日公转轨道上的近日点相对于天球坐标系有逆时针方向的旋转，称为近日点的进动。根据牛顿万有引力计算，其值为5557.62秒/百年。但是，实际观测值为5600.73秒/百年。两者相差为43.11秒/百年。这一根据牛顿万有引力定律计算的水星近日点进动值与观测值的分歧，称为水星近日点异常进动。用广义相对论计算的水星近日点进动值，与观测值只相差0.08秒/百年，成功地解释了这一问题。后来，金星、地球等行星的异常进动也被一一测得，而且与广义相对论也完全符合。这就有力地证明了广义相对论的正确性。

(2) 光线在引力场中的偏转。根据广义相对论，光线在引力场中应沿曲线传播。爱因斯坦根据广义相对论算出，以掠射方式正巧通过太阳边缘的星光，其偏转角为1.74秒（如图1所示）。这一理论引起了英国天文学家爱丁顿（A. S. Eddington）的极大兴趣。他认识到当日全食发生时，在白天也能看到恒星，这时测量正在日轮边缘恒星的位置，再在几个月或半年后，在黑夜测量同一些恒星的位置加以比较，就能算出这些恒星的光线在传播路途上经过太阳引力场时引起的偏转。1919年5月29日发生日全食，全食带横贯南大西洋两岸。英国皇家天文学会派出



图1 星光在太阳引力场中的偏转

两个日食观测队。一队由爱丁顿率领，前往西非几内亚湾的普林西比岛，另一队前往巴西的索布拉尔。两地测量结果的平均值为 1.80 秒。1922 年 9 月 21 日，美国立克天文台台长坎贝尔 (W. W. Campbell) 参加了在西澳大利亚沃拉尔的日全食观测，测得了星像相应的偏离值为 1.72 秒。这些结果与爱因斯坦的预言都相当吻合。

(3) 光线的引力红移。根据广义相对论，光线在引力场中波长变长。从一颗巨大质量的大密度恒星表面发出的光线，其光谱向红端移动，这称为引力红移。星体表面引力越强，所发出的光的引力红移现象就越显著。1924 年，爱丁顿通过理论计算求得天狼星伴星的密度高达 53 千克每立方厘米。这一结果在当时看来似乎是不可思议和荒谬的。其实这是人们发现的第一颗白矮星。爱丁顿认为这样高的密度是可能存在的，它的表面引力场必然很强，因此引力红移容易测得。于是，爱丁顿写信给美国天文学家亚当斯 (W. S. Adams)，请他用威尔逊山天文台配有高色散摄谱仪的 2.5 米反射望远镜，来测定天狼星伴星光线的引力红移。1925 年，亚当斯测定了它的值，与爱丁顿根据广义相对论推算的理论值符合得很好。

(4) 电磁波传播的引力延迟。根据广义相对论，电磁波往返一次的时间会受到传播途径上引力势的影响而产生延迟效应。1967~1970 年，美国天文学家夏皮罗 (I. I. Shapiro) 等在水星和金星分别处于上合附近时 (即行星、太阳、地球几乎处于一直线上时，此时从地球至行星来回的电磁波要经过太阳引力场)，向它们发送雷达信号，并接收回波，精确地测定了雷达信号往返于地球与这两颗行星之间时受太阳引力场作用而造成的延迟效应，其结果与应用广义相对论计算的数值完全吻合。

至于广义相对论在地面物理实验室中的验证，已是 20 世纪 60 年代的事。物理学家庞德 (R. V. Pound) 等人用穆斯堡尔效应在地面上测量了源与吸收体在高度上相距 22.5 米时的 γ 射线的能量位移，在 1% 的精度内验证了广义相对论预言的重力位移效应。

- 2 宇宙奇点。求解广义相对论中的爱因斯坦场方程，可以得到描述时空结构的解。但是在这种解中存在奇性。例如 1916 年史瓦西关于真空球对称引力场的解中，在 $r = 2MG/c^2$ 和 $r = 0$ 处是奇异的。直到 1959 年才发现，只要引入两个坐标系来覆盖时空，就可以避免 $r = 2MG/c^2$ 处的奇点。但是 $r = 0$ 处的奇点却不是由于这种坐标选取不当而带来的虚假的奇点。

在黑洞物理学中， $r=2MG/c^2$ 构成了史瓦西黑洞的封闭边界，光线和其他任何物质都不能越过这个边界跳到外面。这个边界就是黑洞的视界。视界不是黑洞物质的实际边界，它只是一个几何位置。黑洞物质全部集中在黑洞中心的一个几何点上，这个只有质量没有体积的几何点，位于 $r=0$ 处，就是宇宙中的一个奇点。根据广义相对论，在球对称的引力坍缩过程中，只要坍缩核的质量足够大，就一定坍缩为黑洞。而一旦形成黑洞，就会一直坍缩到奇点。20 世纪 60 年代末，英国物理学家彭罗斯 (R. Penrose) 提出奇点只能出现在黑洞之内。

彭罗斯和霍金运用整体微分几何的方法来研究广义相对论。他们证明，只要关于物质、能量和因果性等一些合理的物理条件成立，广义相对论中就不可避免地存在着奇点。在这类奇点处，时空流形达到尽头。不仅在宇宙模型中起始的奇点是这样，在星体中引力坍缩终止的奇点也是这样。由于不知道奇性所遵循的规律，物理学，包括广义相对论，将随着奇点的出现而失效。但是，一般认为，出现这种运动起始或终止于奇性的现象反映了广义相对论理论上的某种不完善，并不一定是客观世界所固有的。克服广义相对论的这个重大疑难，将会使物理学对于时间、空间和引力的认识达到更高的境界。

- 3 米歇尔 (John Michell, 1729~1793)，英国地质学家和天文学家，1762 年任剑桥大学地质学教授，1767 年任桑希尔学校校长，1760 年当选为伦敦皇家学会会员。他提出了地震的原因和地震波传播的途径，发明了扭秤，英国物理学家 H·卡文迪什用扭秤在实验室测定了万有引力常数。他还首次提出了大质量天体的引力可能拽住光线的设想。
- 4 哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope)，美国宇航局和欧洲空间局联合研制的天文观测卫星，1990 年 4 月 25 日由美国“发现号”航天飞机运载升空。卫星轨道在地球上空 614 千米，环绕地球周期约 96 分钟。它全长 12.8 米，直径 4.27 米，总质量 11.6 吨，由光学部分、科学仪器和辅助系统 3 部分组成。光学部分是一架由口径为 2.4 米的主镜和装在主镜前 4.5 米处、口径为 0.3 米的副镜组成的望远镜，主、副镜都是双曲面反射镜。科学仪器共有 8 台，宽视场和行星照相机、暗弱天体照相机、近红外照相机和多目标摄谱仪、高分辨率摄谱仪、高速光度计和 3 台精密的制导传感器，安装在主镜焦平面上，都做成插入式的，更换十分方便。美国宇航局制定了在轨道上对哈勃空间望远镜进行维护的计划。自发射升空以来，哈勃空间望远镜已于 1993 年、1997 年和 1999 年 3 次由航天飞机前往执行维修和撤换仪器的任务，先后替换上所谓的“第二代仪器”和“第三代仪器”，保证了哈勃空间望远镜能源源不断地发回高质量的信息 (参看图 2)。

哈勃空间望远镜运行在地球大气层外，摆脱了大气对天文观测的一切干扰。因此，它的威力远远超过地面上的所有光学望远镜。它能观测到暗至 29 星等的天体，相当于看到 500 千米之外一支蜡烛的光。它提供的图像比地面观测到的清晰 10 倍。

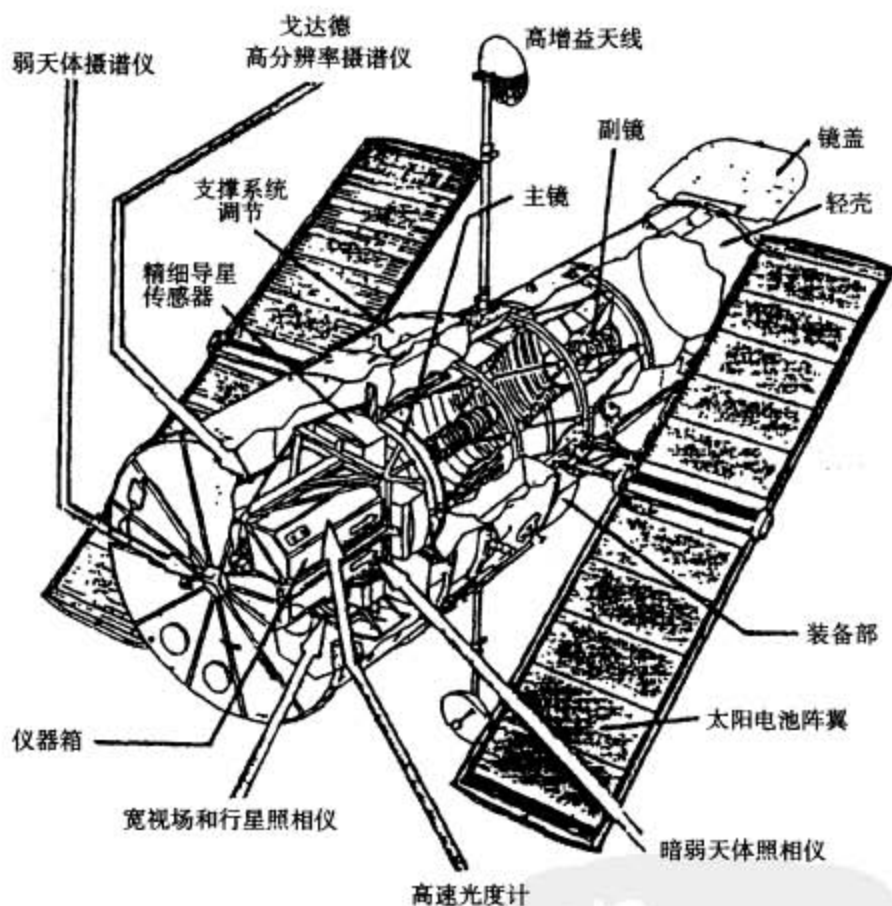


图2 哈勃空间望远镜的结构

它能探测极其遥远的星系，从而揭示宇宙的结构，展现出星系的演化过程。目前探测到的最遥远的星系距离达 137 亿光年。它曾观测到致密天体将物质吸入使之消失的景象，直接证实了黑洞的存在。它将探测到的天体图像和光谱信息传送到比它的轨道更高的同步通信卫星，再下传到地面站，送达美国空间望远镜科学研究所（参看图 3）。

- 5 钱德拉 X 射线天文台 (Chandra X-ray Observatory)，原名高级 X 射线天体物理卫星，1977 年开始由美国休斯公司、宾州大学、麻省理工学院和戈达德空间飞行中心联合研制，1999 年 7 月 23 日由美国“哥伦比亚号”航天飞机运载升空。卫星轨道远地点 14 万千米，近地点 1 万千米。它全长 17.4 米，重 21 吨，是迄今最大、最重、最昂贵的天文探测卫星。它装备有 X 射线掠射成像望远镜，能以前所未有的高

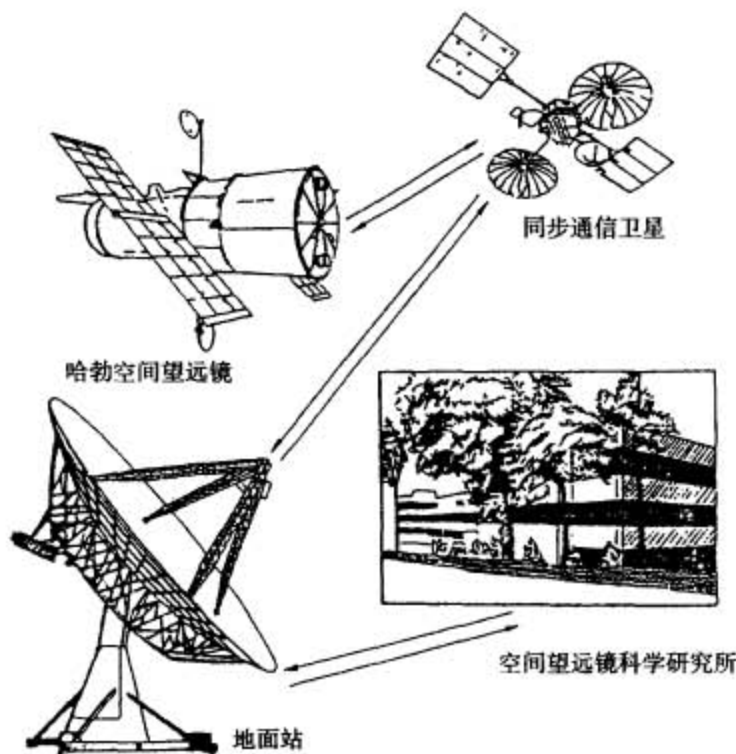


图3 哈勃空间望远镜的实时观测系统

灵敏度和高分辨率拍摄天体的 X 射线像和 X 射线光谱。这对于恒星晚期演化过程，特别是对暗物质和黑洞的探测有极其重要的意义。钱德拉 X 射线天文台于发射前夕为纪念已故美籍华裔天文学家钱德拉塞卡而改用此名。

第1章

- 1 吴庭艳 (Ngo Dinh Diem, 1901~1963), 越南政治领袖, 1954 年起直到被枪杀, 一直任越南共和国 (南越) 具有独裁权力的总统。他是皇族出身, 信仰天主教, 20 世纪 30 年代任保大皇帝的内政大臣, 1945 年被胡志明的军队俘获。胡志明劝他参加北方政府, 他拒绝这个建议, 流亡国外近十年之久。1954 年回国, 领导美国扶植的南越政府。在他统治时期, 共产主义的力量不断壮大。他以煽动共产党叛乱分子为口实, 监禁并杀害许多佛教徒, 最终导致美国撤销对他的支持。后在军事政变中被击毙。
- 2 禁止核试验条约 (Nuclear Test-Ban Treaty)。1963 年 8 月 5 日, 美国、前苏联、英

国3个发起国在莫斯科签订该条约。条约禁止在大气层、外层空间和水下试验核武器，但允许地下试验。条约宗旨：阻止核武器向更多国家扩散；减少或消除放射性尘埃的危害；放慢军备竞赛的步伐；作为缓和国际紧张局势和扩大核武器控制范围的一个步骤。但是条约没有规定减少核武器储备、停止制造核武器或在战时限制使用核武器，也没有要求设立控制点、现场核查和国际监督机构。

- 3 弗里丹 (Betty Friedan, 1921~2006)，美国作家，女权运动者，1921年出生在美国伊利诺伊州一个犹太移民的珠宝商人家庭，1942年毕业于史密斯学院，随即进入加利福尼亚大学伯克利分校攻读心理学硕士，毕业后先后担任记者、编辑，1957年起从事女性问题的研究，1963年出版《女性奥秘》一书，提出美国女性当时的生活方式存在“很大错误”。此后弗里丹正式踏上女权运动的道路。她协力建立了美国全国妇女组织，担任首任主席；1970年曾组织全美女性大罢工。正如《纽约时报》所点评的，《女性奥秘》一书“点燃了当代女权运动，并因此永久改写了美国等国家的社会结构”。现在此书被普遍视为20世纪最具影响力的书籍之一。
- 4 肯尼迪 (John F. Kennedy, 1917~1963)，美国第35届总统。他毕业于哈佛大学，第二次世界大战中曾在海军服役，29岁竞选众议员获胜，连任三届。在国会里，他对内重视社会救济和平民福利，对外反对共产主义，支持冷战。他于1953年进入参议院，50年代后期任参议院外交委员会委员，1958年连任参议员，1960年1月宣布竞选总统，结果以微弱优势击败共和党候选人，并于1961年就任，成为美国历史上最年轻的总统。他以强硬态度处理冷战中出现的危机，但也实现了缔结禁止核试验条约。肯尼迪的进取精神和勤奋作风赢得许多人的称赞。1963年11月，他在得克萨斯州达拉斯市遇刺身亡。
- 5 月掩星方法测定射电源位置。射电望远镜的分辨率同光学望远镜一样，与电磁波的波长成反比。分辨率是指能把天空中两个源分开的最短角距离。望远镜的分辨率越大，即使天空中两个靠得很近的天体，也能清楚地分辨开来；反之，则可能会把彼此分离的几个源误认为一个源。射电望远镜接收天体发射的无线电波，其波长比可见光长得多。由于普通口径的单面射电接收天线的分辨率很低，因此不能用它精确地测定射电源的位置。20世纪60年代的射电望远镜分辨率普遍不高。1962年，月亮正好掩食射电源3C 273，也就是从地球看去，月亮将从这个源的前面经过，把它挡住。掩食发生的瞬间，这个源的射电信号从观测它的射电望远镜内消失；掩食结束，这个射电源再现的瞬间，信号恢复。由于信号消失和恢复的两个时刻能精密地测定，也能精确地确定这时的月亮位置，这样就能进一步推算射电源的位置。澳大利亚天文学家哈扎德等人据此准确地定出了3C 273的位置和形状。他们发现这是一个双射电源，其中之一与一颗13星等的恒星状天体相对应。
- 6 这种现象在物理学上称为多普勒效应。即观测者与波源之间有相对运动时，观测者测得的波频率与波源发出的波频率不同的现象。这一普遍的物理现象是奥地利物理

学家多普勒 (J. C. Doppler) 在 1842 年首先发现的。如果波源是声源, 例如火车的汽笛, 当火车向我们开来时, 其汽笛声调变高昂 (即声波频率变高, 波长变短), 而远离时声调变低沉 (即声波频率变低, 波长变长)。如果波源是光源, 例如天空的星星, 则当星星与我们接近时, 光谱向蓝端移动 (简称“蓝移”, 即光波频率变高, 波长变短), 而远离时光谱向红端移动 (“红移”, 即光波频率变低, 波长变长), 如图 4 所示。这种谱线位移 (蓝移或红移) 的量, 与光源相对于观测者的运动速度成正比。远距离的河外星系, 包括类星体, 随宇宙膨胀以很大的速度远离我们, 所以能在它们的光谱中测量出很显著的红移量。

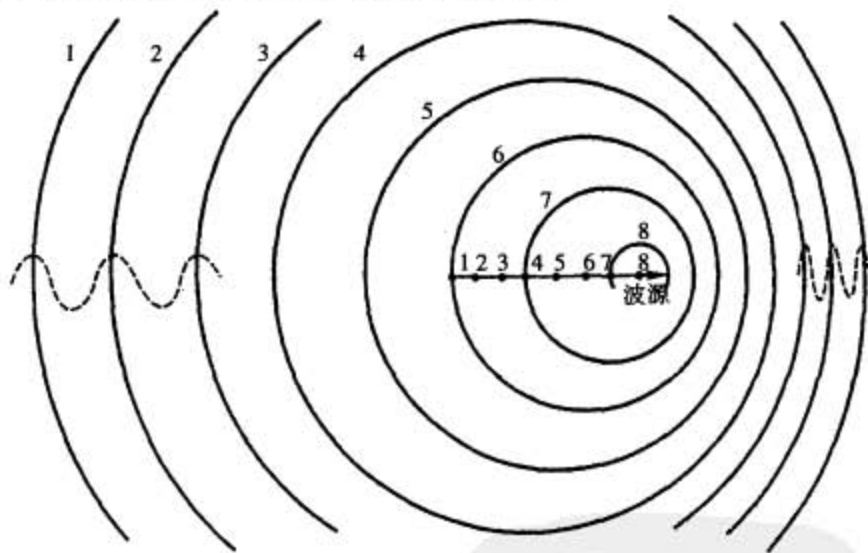


图4 多普勒效应

- 7 哈勃, 美国天文学家, 1917 年于芝加哥大学获天文学、哲学博士学位, 从军参战后于 1919 年起, 在威尔逊山天文台工作 30 多年, 直到逝世。哈勃对 20 世纪的天文学做出了多项重大贡献, 被尊为“一代宗师”。其中最重大者有二: 一是确认星云并非都在银河系中, 其中许多都是与银河系相当的星系。这项成果于 1924 年发表, 开创了星系天文学, 建立了大尺度宇宙结构的新概念。二是发现了星系的距离越远, 远离速度越快, 两者成正比关系。这一关系被称为哈勃定律, 于 1929 年发表, 促进了现代宇宙学的发展。此外, 他于 1926 提出了河外星系的形态分类法, 被称为哈勃分类, 一直沿用至今。由于他对天文学的贡献, 他于 1935 年获巴纳德金质奖章, 1938 年获富兰克林金质奖章, 1948 年当选为牛津大学女王学院院士。
- 8 这个关系称为哈勃定律。20 世纪 10 年代, 美国天文学家斯莱弗 (V. M. Slipher) 拍摄了数十个旋涡星云的光谱, 发现它们大多存在谱线红移。根据光源运动的多普

勒效应，这种红移解释为这些星云在不断退行，即远离我们而去。哈勃不仅参与测量它们的谱线红移和退行速度，而且千方百计地测量它们的距离。1929年哈勃发表了他的研究成果，指出河外星系的退行速度 V 与它们的距离 D 之间存在正比关系，即 $V=HD$ 。这个关系称为哈勃定律，式中的比例系数称为哈勃常数。

- 9 宇宙膨胀。哈勃从他发现的哈勃定律得出结论：可观测宇宙正在膨胀。这种膨胀是均匀的，即任一对星系互相分离的相对速度与它们之间的距离成正比。为了帮助理解均匀膨胀的含意，可以设想一根棒上的3个点A、B、C，且 $AB=BC$ ，当棒在纵向均匀膨胀时，无论从哪一点看，其余两点都在远离，而且退行速度与间距成正比，如图5所示。

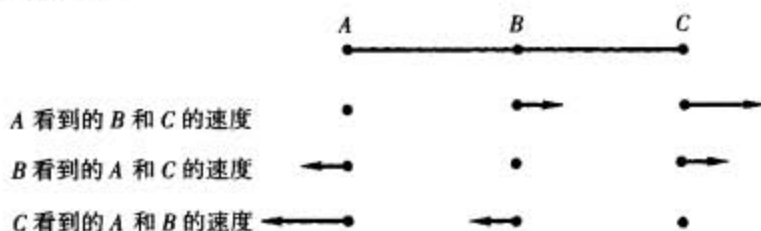


图5 均匀膨胀的棒上等间距的3点所见的各点的速度

根据现代宇宙学的观点，宇宙是没有中心的。用一个布满斑点的均匀膨胀的气球更能反映这个特点。请见图6，设想宇宙是一个两维的球面，各个斑点代表星系，球面上没有中心。从气球表面上任何一点看其他各点的运动都满足上述规律。从这个例子更能看出，只要可观测宇宙在均匀膨胀，则任何星系上的观测者应同样观测到其他星系都在退行，并且得出同样的哈勃定律。银河系的地位无任何特殊之处。

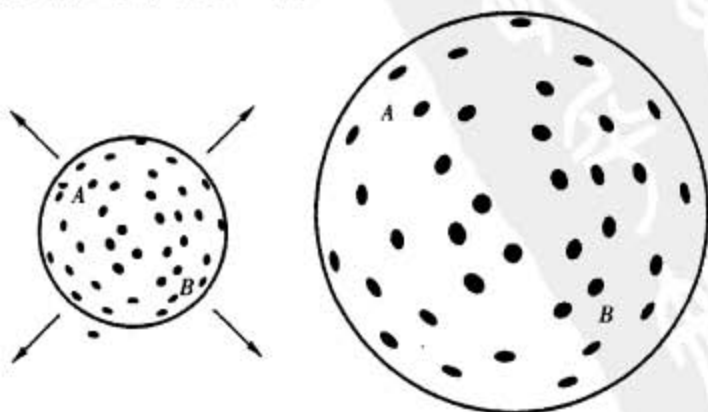


图6 气球膨胀时，球面上任意两点（例如A和B）之间距离的增加率正比于距离，不管从哪一个点看，所有其他的点都在均匀地离它退行

- 10 卓别林 (1889~1977), 美国电影演员和导演, 出生于英国。他出生在杂耍剧团家庭, 8岁登台表演, 17岁进卡尔诺公司 (英国杂剧团), 1913年加入美国基斯通公司, 遂开始电影生涯。他的喜剧从一开始就造成轰动。他在无声片中以其特有的形象, 创造了一个哀婉动人、幽默风趣的流浪汉角色。他塑造的这种“小人物”反映在《流浪者》(1915)、《寻子遇仙记》(1921)、《淘金记》(1925)、《城市之光》(1931)、《摩登时代》(1925)和《大独裁者》(1940)等影片中。1942年他曾号召开辟第二战场对德作战, 1953年赴瑞士定居, 1957年创作反对美国众议院非美活动委员会的影片《纽约之王》, 而被指责为亲共。1966年他自编自导自演最后一部影片《香港女伯爵》, 1972年返回美国接受美国电影艺术与科学院的特别奖。
- 11 海斯 (1900~), 美国女演员。5岁开始舞台生涯, 在一些天真活泼姑娘角色的扮演中获极大成功。成年后, 在舞台上演过萧伯纳的《恺撒与克莉奥佩特拉》(1925)、豪斯曼的《维多利亚女王》(1935)、威廉斯的《玻璃动物园》(1956)、阿努伊的《难忘的时刻》(1957)和奥尼尔的《长夜漫漫路迢迢》(1971)等。她也参加广播剧、电视剧和电影的演出。电影有《向武器告别》(1932)、《马德伦·克劳德的罪孽》(1932, 获奥斯卡奖)和《飞机场》(1969)等。1940年获广播剧最佳女演员奖, 1952年获埃米奖。1955年纽约市的富尔顿剧院为对她表示敬意而改名为海伦·海斯剧院。
- 12 赫斯特 (1863~1951), 美国报纸发行人。其父为加利福尼亚州参议员, 并发行旧金山《考察人》报。他曾在哈佛大学肄业2年, 1887年接办《考察人》报, 接办之后两年即扭亏为盈。他于1895年购买纽约《晨报》(后改名《美国人日报》), 采取种种有效措施, 乃至鼓吹美国向西班牙开战 (1897~1898), 很快使发行量达到空前纪录。1925年, 赫斯特在美国各地区都拥有报纸, 并有几家杂志, 成为大托拉斯系统。他还出版小说、摄制电影。他的编辑方针和势力使美国“黄色新闻”日见增多。其他报纸则对他进行抵制, 在新闻报道和编辑方针方面采取更为严谨的态度。
- 13 钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910~1995), 印裔美籍天体物理学家, 1933~1937年在英国剑桥三一学院任教, 1937年移居美国, 在芝加哥大学叶凯士天文台工作, 1938年任教授, 1955年当选美国科学院院士。他在恒星内部结构理论、星系动力学、相对论天体物理学等方面都有重大贡献。他从其建立的白矮星模型导出白矮星的质量上限是太阳质量的1.44倍。这就是著名的钱德拉塞卡极限。1983年, 他因对恒星结构及其演化理论做出重大贡献而获诺贝尔物理学奖。
- 14 原文如此。熵系“它的大小是22×22毫角秒, 在3C 273的距离上大致相应于320×320光年”之误。
- 15 甚大望远镜 (Very Large Telescope) 由欧洲空间局设置在智利北部沙漠中的帕拉

那尔山，海拔 2635 米。它由 4 台望远镜组成，每一台具有 8.2 米的反射镜。4 台望远镜由计算机控制实施同步观测，它们的光线结合成一个光束，相当于一台口径 16 米的大望远镜。每一台望远镜都运用了主动光学和自适应光学技术。4 台望远镜分别按智利北部一个印第安部落马普切人语言中的太阳、月亮、南十字座和金星的名字命名。

- 16 凯克望远镜 (Keck Telescopes) 由美国设置在夏威夷岛莫纳·基亚死火山上，海拔 4.3 千米，包括两台同样大小的大型望远镜。它们的物镜各由 36 块六角镜面组合而成，每块镜面宽度为 1.8 米，厚度仅为 10 厘米，每台物镜的有效口径为 9.82 米。通过主动光学支撑系统，镜面保持极高的精度。两台望远镜相继于 1991 年和 1996 年落成。凯克望远镜因其主要经费由企业家凯克 (W. M. Keck) 捐赠而命名。
- 17 梅西叶 (Charles Messier, 1730~1817)，法国天文学家。1751 年，梅西叶在法国天文学家 J·N·德利尔处当天文观测员。他是法国第一个观测到预期在 1758~1759 年回归的哈雷彗星的人。从此以后，他成为新彗星的热情搜索者，被誉为“彗星猎手”，曾独立发现了 13 颗彗星。1760 年，他开始编制星云表，以便能更好地区别星云和彗星。当时星云是用来表示天上任何模糊不清光源的术语，在那时的小望远镜中与彗星很难分清。1764 年，梅西叶当选为伦敦皇家学会的外国会员；1770 年入选巴黎科学院。
- 18 梅西叶星表 (Messier Catalog) 简称 M，由梅西叶编纂，是包括 109 个星团、星云和星系的表。梅西叶本人就发现了表中的许多天体。1771 年，他出版了包含 45 个这种天体的初版本，10 年后又编成了总表。到 1784 年一共编入了 103 个天体。1786 年，P·梅尚又增加了 6 个。星表中列入的天体，按现代的眼光可分成性质截然不同的 3 大类。第一类和第二类都在银河系之内，第一类为星云，即由气体和尘埃组成的弥漫物质的无定形天体；第二类为星团，即恒星的集合体，包括球状星团和疏散星团。第三类属于银河系之外的天体，即河外星系，包括旋涡星系、椭圆星系和不规则星系。星表的编号现在还广泛沿用，例如蟹状星云 (M1)、昴星团 (M45)、仙女星系 (M31) 等。此星表现在对天文爱好者仍然是很有用的。

第 2 章

- 1 视界 (horizon) 是黑洞的边界，或称单向膜。黑洞的视界是时空中的分界。

彭罗斯定义的黑洞视界是“所有试图逃逸出去的光子统统都被引力拉回的最后边界”，霍金定义的黑洞视界是“空间中是否有能力向遥远宇宙发送事件信号的最后边界 (视界外的事件能发送，而视界内的事件不能)”。视界将黑洞与宇宙的其他部分截然分裂，外部的物质和能量可以进入视界，而视界内没有任何物质和能

量可以逃脱出去。在视界以外，可以由光信号在任意距离上相互联系，这就是我们所居住的正常宇宙；在视界以内，光线并不能自由地从一个事件传播到另一个，而是都朝向中心集聚，事件之间的联系受到严格的限制，这就是黑洞。

不旋转的球状黑洞（史瓦西黑洞）的视界是以引力半径 r_g 为径向坐标值的球面： $r_g = 2GM/c^2$ ，式中 M 为黑洞的质量， G 为万有引力常数， c 为光速。对于有旋转运动的黑洞（克尔黑洞），视界的径向坐标为： $r = GM/c^2 + \sqrt{(GM/c^2)^2 + (J/Mc)^2}$ ，式中 J 是角动量。当 $J=0$ ，即黑洞无旋转时， $r=r_g$ ，克尔黑洞就退化为史瓦西黑洞。

视界不是黑洞物质的实体边界，只是一个几何位置。黑洞物质全部集中在黑洞中心的一个几何点上，这个只有质量没有体积的几何点称为奇点。黑洞的密度定义为视界包围的体积内的平均密度。黑洞的密度与视界内黑洞质量的平方成反比。因此质量越大的黑洞，平均密度越小（参见本书第6章）。

按广义相对论的时空弯曲理论，恒星的质量坍缩到史瓦西半径以内时，时空将完全封闭，光球消失，视界形成，即恒星坍缩成为黑洞。图7显示了一个球对称恒星引力坍缩过程中4个阶段光子发射的情况，其中（a）是坍缩以前的情况，从恒星表面发出的光子可以朝任何方向沿直线射出；（b）显示恒星半径开始坍缩，时空弯曲程度增加，一部分光子落回恒星表面；（c）显示恒星已坍缩到临近史瓦西半径，光子局限在一个锥形空间里；（d）显示恒星已坍缩到史瓦西半径，光子能够逃逸的锥形空间完全关闭，全部光子都被囚禁起来，一个也不能逃逸出去。

- 2 开普勒的多面体 (Kepler's polyhedra)。开普勒是德国天文学家，在大学期间学习了天文学，并成为哥白尼“日心学说”的热诚拥护者。后来，他在奥地利格拉茨的基督教会学校任教，业余时间全力钻研天文学，力图阐明“上帝宇宙的布局”（即行星在太阳系里的位置）。他认为，根据欧几里得几何学，正好有5种正多面体（正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体和正二十面体，见图8），不多也不少，而行星一共只有6个（当时仅知5大行星和地球），那么上帝这位伟大的几何学家，是否将这5种正多面体置于各行星所在的天球之间呢？如果是这样，6个行星所在的天球球面正好应该外接于和内切于这5种正多面体，即任意两相邻行星之间都存在一种正多面体，其外接球半径等于外面那颗行星所在天球的半径，而其内切球半径等于里面那颗行星所在天球的半径。当时，人们已经知道了各行星到太阳的相对距离（以日地距离为单位表示的各行星到太阳的距离）。经过反复试算，最后他得出6大行星与5种正多面体的配置关系是：土星→正立方体→木星→正四面体→火星→正十二面体→地球→正二十面体→金星→正八面体→水星，如图9所示。在这样的配置下，外接球与内切球半径之比，确实与各行星所在天球到太阳的距离之比符合得相当好。开普勒认为，他已经揭示了上帝为宇宙选择的几何结构。1596年，25岁的开普勒出版了《宇宙的神秘》一书，书中公布了上述见解。这本书作为一本无可辩驳的日心学说著作，在当时为证实和宣传哥白尼学说具有重要意义，因为那

么一系列球体和正多面体不可能如此适合于以地球为中心的体系。

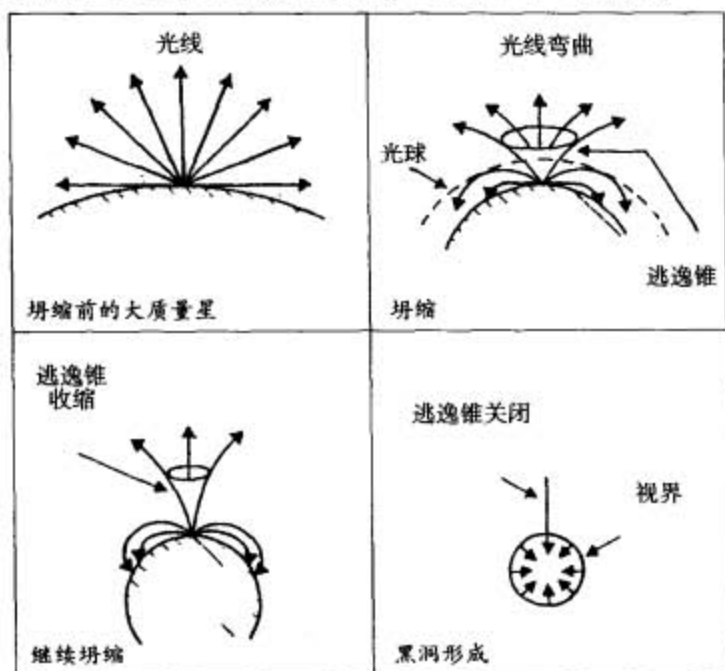


图7 恒星坍缩形成视界的过程

- 3 甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)。射电干涉测量是1967年春在加拿大(基线长200米)和美国(基线长650米)几乎同时实验成功的。此后相继进行过多次洲际干涉实验。中国于1981年11月27日至29日与前西德成功进行了首次VLBI实验(基线长约8200千米)。

射电望远镜与光学望远镜一样,有一个性能指标称为“分辨率”,也称“分辨本领”。“分辨能力”是指能把天空中两个分立的源区分开来的最小角距离。这个值越小,望远镜越能“看”清天体的细节,分辨本领越高。这个值与望远镜所接收的天体发射的电磁波波长成正比,与望远镜的口径成反比。由于射电望远镜所接收的射电波的波长都很长,因此单台射电望远镜的分辨率都很低,除非把接收天线的口径做得很大很大,但是这受到技术和资金的限制。科学家们设计了以相隔较远的两台(或多台)射电望远镜同时接收同一个源的射电信号,通过把这些信号做相关处理(称为“干涉”),来达到提高分辨率的目的。两台望远镜之间的距离称为基线,基线越长,相当于“单台”望远镜的口径越大,分辨率越高。VLBI的基线长达几千千米甚至上万千米,极大地提高了分辨率。现在正在计划建造的空间VLBI,要把一台或数台望远镜安置在人造卫星上甚至月球上,更是极大地延长了基线。

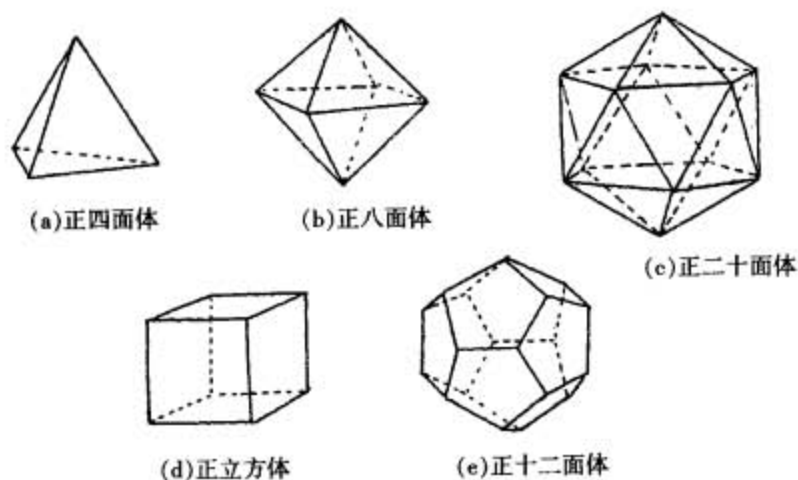


图8 5种正多面体

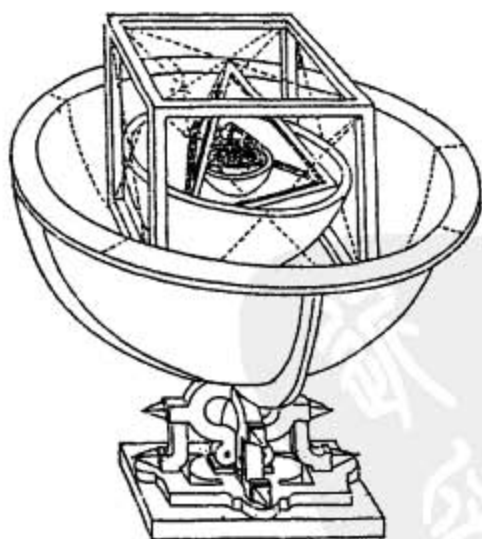


图9 开普勒用正多面体配置的宇宙模型

在 VLBI 系统中的每一台望远镜必须配备精度极高的原子钟，它们通过时间比对达到高度同步，以提供精密的时间信息。观测的时候，每一台天线接收的射电信号经放大器放大后与时间信息一起用磁带机记录在磁带上。事后送至一个处理中心，在大型计算机控制下集中做相关处理，从而获得最终的观测信息（见图 10）。

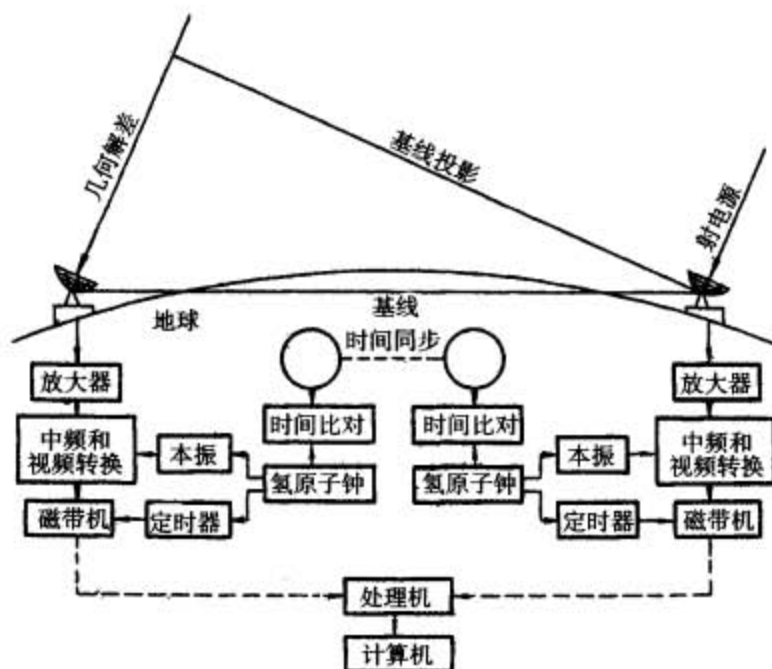


图 10 甚长基线干涉仪工作原理

第 3 章

- 1 大卫与歌利亚 (David and Goliath)。大卫是古以色列国的第二代国王，在公元前 1000 年左右建立统一的以色列王国，定都耶路撒冷。多年来犹太人恢复故国故都的期望都以大卫为中心。

据《圣经·旧约》记载：大卫生于伯利恒，少年时多年放羊，骁勇善斗，曾用拳头打死过偷袭羊群的狮子和熊。当时菲利士人对以色列开战，以色列国王扫罗率军迎战。菲利士营中的大将军哥利亚威武雄壮，以色列营中无一人敢与之交战。哥利亚每日来到阵前讨战叫骂，一连 40 日，以色列营门紧闭。一次，大卫来到军中，听到哥利亚的狂言叫骂，气得浑身发抖，要求出去迎战，得到了国王扫罗的同意。大卫带上了放羊用的木棍、弹弓，又在河边拣了 5 块鹅卵石，迎战哥利亚。菲利士人急不可待地盼着哥利亚把大卫杀死，而以色列人都提心吊胆地为大卫捏着一把汗。哥利亚狂妄自大，完全不把少年大卫放在眼里；大卫迅速地取出一块石子，压入弹弓的弓弦，使劲投射出去，正中哥利亚的脑门儿。哥利亚一头栽倒在地，再也

爬不起来。以色列人乘胜追击，把非利士人杀得丢盔弃甲，终于大获全胜。从此，大卫以他的赫赫战功，受到以色列百姓的衷心拥戴。后来，他娶扫罗之女米拉为妻。扫罗和他的儿子约拿丹在一次战斗中阵亡后，大卫登位称王。大卫率军重创非利士人，次第征服邻近各小国，兼并地中海沿岸地带，建立了以耶路撒冷为首都的王国。

1501~1504年，意大利艺术家米开朗琪罗以出战前的少年大卫为素材雕刻了大理石的《大卫像》，成为不朽的传世之作，现保存在佛罗伦萨美术学院（见图11）。

- 2 关于海王星的预言（prediction on the Neptune）。1781年，英国天文学家威廉·赫歇尔发现了天王星。此后，人们不断地对它进行观测，发现它后期的观测位置与以早期观测为基础按行星运动理论算得的位置显著偏离，而且这种偏离与时俱增。到了19世纪30年代，天王星的位置误差与早期相比已积累达到了20秒。这时，有人对建立在万有引力定律基础上的行星运动理论，甚至对万有引力定律本身的正确性提出了疑问。

但也有有人认为，这可能是由于天王星轨道外一颗未知行星的摄动（即引力影响）所造成的。

要从天王星受到的摄动来反推引起这一摄动的未知行星的位置，这是十分困难的工作。然而，当时剑桥大学的青年天文学家J·C·亚当斯经过两年的努力，于1845年9月算出了这个未知行星的轨道，并在当月和下月相继向剑桥大学天文台台长查利斯和格林尼治天文台台长艾里做了报告，但他们两人都未予以足够的重视。在法国，青年天文学家勒威耶也进行着类似的工作，他于1846年8月发表了一篇题为“论使天王星失常的行星，它的质量、轨道和现在位置的确定”的重要论文。因当时巴黎天文台缺乏详细的星图，1846年9月，他写信给柏林天文台的伽勒，请他帮助寻找，而伽勒在9月23日收到此信的当晚，就用望远镜发现了它。又经几天的进一步观测，伽勒确认它确实是一颗新行星，这颗行星后来被命名为海王星。海王星的发现不仅解释了天王星的反常运动之谜，而且有力地证明了哥白尼日心体系和万有引力定律的正确性（见图12）。



图11 米开朗琪罗雕刻的《大卫像》

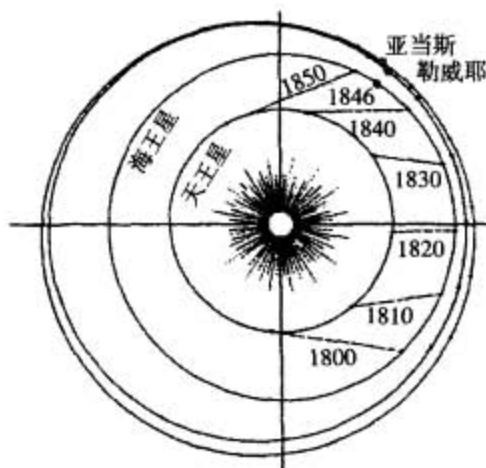


图 12 亚当斯和勒威耶各自计算的海王星轨道和位置与实际轨道和位置的比较
(与当时的海王星位置相差甚小)

- 3 不相容原理 (exclusion principle)。这个原理是奥地利物理学家 W·泡利在分析了大量原子能级数据的基础上，为解释化学元素周期性，于 1925 年提出来的，又称泡利不相容原理。这一原理可以表述为：对于完全确定的量子态来说，每一量子态中不可能存在多于一个的粒子。后来人们又认识到只有自旋为半整数的粒子（即费米子）才受不相容原理的限制。

按照量子力学，粒子的运动状态是充分量子化的，不是连续可取的，更不是任意的，状态的种数有一定的限制。如果在某一空间范围内已有足够多的费米子占满了所有各种运动状态（在量子化的条件下就是量子态），那么由于泡利不相容原理的支配，就不容许再多出一个费米子去占据任何一种已被占据的状态。这种情况类似于当剧场已经客满时，不容许再增加任何一位观众进场，因为所有的座位已经占满了。这时必然会产生一种力抵制多余的费米子进入这一空间范围。在量子力学中，这种力被称为简并压力。一颗稳定的中子星，其内中子的简并压力与自身的引力保持平衡。在某种条件下，一旦自引力超过了简并压力，就会坍缩成黑洞。

第 4 章

- 4 哈勃序列 (Hubble sequence)。美国天文学家哈勃在大量观测资料的基础上，于 1926 年提出了一个星系的分类方案。在这个分类中，星系按形状分成椭圆星系、旋涡星系和不规则星系三大类，旋涡星系又分为正常旋涡星系和棒旋星系两族。

(1) 椭圆星系。这类星系呈椭圆形或正圆形，没有旋涡结构，通常中央较密，包含一个核，但也有些并没有核，没有或仅有少量气体和尘埃。它们的形状彼此相似，主要差别在于扁度以及表面亮度向外的下降率不同。椭圆星系用字母E表示，按照扁度的不同，椭圆星系分为E0、E1、…、E7 8个次型。

(2) 旋涡星系。具有旋涡结构的星系叫做旋涡星系，旋涡结构表现在从星系中央部分向外有称作旋臂的亮条或暗条缠绕着；旋臂通常有两条，也有更多的。旋臂位于很薄的平面内。旋涡星系按照中央部分呈椭球状或棒状而分为正常旋涡星系和棒旋星系两族，分别以字母S和SB表示。在哈勃分类中，按照旋臂缠绕由紧到松的程度，正常旋涡星系分为Sa、Sb、Sc 3个次型。正常旋涡星系中央一个范围颇大的椭球形部分是核球，其外面是包括旋臂在内的扁盘。从Sa到Sc，随着旋臂缠绕趋于松弛，核球相对于扁盘的大小递降，于是形成了几方面的特征都单调变化的一个序列。棒旋星系除了中央部分的形状之外，其余各方面都与正常旋涡星系类似。同样按照旋臂缠绕的松紧程度，棒旋星系也分成SBa、SBb和SBc 3个次型。

透镜状星系有明亮的核球和扁盘，但没有旋臂，形似透镜，气体和尘埃的量比a型旋涡星系少得多。哈勃仍将它们归入旋涡星系，按照其中央部分呈椭球形或棒状，分别以S0或SB0表示。哈勃曾把透镜状星系设想为椭圆星系与旋涡星系之间的过渡星系，并绘制了一幅形如音叉的图（见图13）。

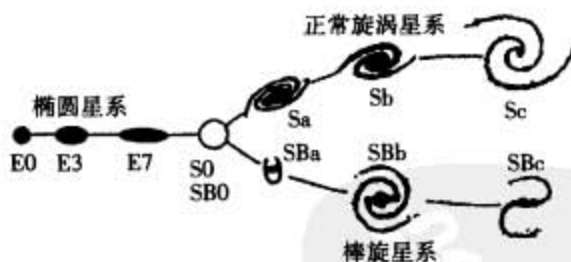


图13 反映哈勃序列的“音叉”图

(3) 不规则星系。不规则星系的符号为Irr，它们没有旋涡结构，形状不对称，不存在可辨认的核，有的好像碎裂成几部分。这类星系又分成两类，其符号分别为Irr I和Irr II。

- 2 引力波 (gravity wave)。1916年，爱因斯坦根据广义相对论预言了引力波的存在。爱因斯坦引力场方程是双曲型偏微分方程，它意味着引力场的扰动将以一个有限速度传播，这种扰动就是以光速传播的引力波。

20世纪50年代，人们求出了爱因斯坦真空场方程的一种以光速传播的平面波前、平行射线的严格的波动解，并证明了检验粒子在引力作用下会产生运动，从而表明了引力波携带着能量。可是任何可观测到的引力辐射的强度都非常低，而且引

力波与物质的作用极为微弱，所以对引力波的探测就极为困难。自从广义相对论预言宇宙空间中可能存在引力波以来，人们建造了许多探测宇宙引力波的实验装置，却均未捕捉到有关引力波的可靠信号。20世纪70年代初，有人宣称探测到了不能排除是来自太空的引力波信号。但是，以后没有人能够重复得到这一结果。引力波的作用实在太微弱了，目前的实验条件还达不到所需的灵敏度。

辐射引力波的源都是天体系统，因此探测引力波也是天体物理学的重大研究课题。宇宙中可能存在三种类型的引力波。第一类是由超新星爆发、致密天体造成的突发事件引发的引力波，其特点是强度大、频带宽，但时间短暂。比如超新星 SN 1987A 就有强大的引力波发生，但它距离较远，地球上的仪器检测不到。第二类是各种双星、具有较大速率的转动星发射的引力波，其频率稳定，但强度小。第三类是无规背景辐射的引力波，是由各种无规运动遗留下来的，包括宇宙极早期各种过程的辐射、各种双星辐射的叠加等。

有的脉冲星是双星中的成员，这样的例子已发现了数十个。其中最重要的一个是1974年发现的 PSR 1913+16，它在天鹰座，距离地球1.7万光年，本身是一颗质量为1.4太阳质量的中子星，脉冲周期59毫秒。这颗脉冲星的独特之处是它的伴星也是一颗具有同样质量的中子星，两者相距只有几百万千米，以7小时45分的周期相互绕转，运动速度达到每秒300千米，引力波辐射将把双星的能量慢慢带走，使整个双星体系的能量变小，绕转周期越来越短，两星距离越来越近。对 PSR 1913+16 追踪12年的观测表明，它们的轨道周期每年减小76微秒，精确数据是 $T=0.322997462$ 天，变化率为 -2.422×10^{-12} 。这一数据与根据广义相对论计算出的理论值 -2.6×10^{-12} 是相当吻合的。在大约3亿年里，两颗中子星将碰在一起，并产生最后的引力爆发。这些观测数据提供了广义相对论关于引力波存在的一个证据。两位发现并进行追踪观测的美国天文学家泰勒和赫尔斯因此而获得了1993年诺贝尔物理学奖。赫尔斯是泰勒的研究生，1974年发现 PSR 1913+16 时，他们的年龄分别是24岁和33岁。

引力辐射理论有可能沟通广义相对论与微观物理学之间的鸿沟，赋予引力学概念以确切的含义。

第5章

- 1 同步加速辐射 (synchrotron radiation)。20世纪40年代中期，原子核物理学家研制了一种名叫同步加速器的新型加速器，能把粒子加速达到 10^8 电子伏特的能量。美国的一组科学家在观察同步加速器内高能电子的运动时，通过玻璃窗看到了一种引人瞩目的现象：高速运动着的电子在其运动的方向上发射出很强的光，当电子的能

量为 3×10^7 电子伏特时，光呈暗红色；能量达到 8×10^7 电子伏特时，光呈蓝白色。通过偏振器观察，当偏振器取某一个方向时可以看到很强的光，在它旋转了 90° 后就几乎看不到光了，表明这种光是偏振的。在同步加速器中发现的这种光就取名为同步加速辐射。它是在磁场中的相对论性电子（速度接近光速的电子）绕磁感应线作螺旋运动时发射的。辐射集中在沿电子运动方向的很窄的角度内，成束状。辐射的频率（波长）依赖于电子的速度和磁场强度，因而这种机制可以产生任何频率（波长），即全波段内的电磁辐射，而且辐射是偏振的（见图 14）。

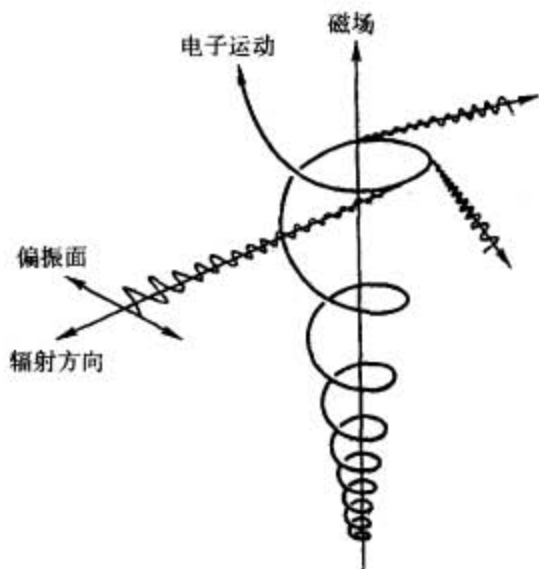


图 14 磁场中相对论性电子的同步加速辐射

在天体物理中，同步加速辐射是一种重要的辐射机制。在射电波段，射电星系、一般星系和超新星遗迹的射电辐射能包含同步加速辐射；在太阳的射电辐射中，也可观测到同步加速辐射。此外，在蟹状星云、某些射电星系和类星体中，还可观测到可见光和 X 射线的同步加速辐射。

黑洞具有极强的引力场，吸引周围的物质向它下落。通常黑洞都在作高速旋转，并拖着周围的时空一起旋转（参见本书第 3 章）。向黑洞下落的物质不可能直接落入黑洞，而是绕着黑洞在轨道上高速旋转，形成一个吸积盘。吸积盘内带电粒子的速度可接近光速，在黑洞的强大磁场内发射 X 射线，这些 X 射线正是一种同步加速辐射。通过对 X 射线源的观测和分析是当前探测黑洞的重要途径。

一个名为天鹅座 X-1 的 X 射线源，是最有希望被证认为黑洞的天体。它是 1965 年被高空 X 射线探测火箭首次发现的。后来，1971 年 3 月和 4 月，乌呼鲁卫星（美国于 1970 年发射的首个宇宙 X 射线探测卫星）记录到它的 X 射线光度有快速变化。它也是一个射电源，其光学对应体是编号为 HDE 226868 的恒星。这颗恒星的视亮度是 9 等，是一颗高温蓝色超巨星，半径为太阳半径的 23 倍，质量为 $25 \sim 40$ 太阳质量，距离太阳约 8000 光年。光谱分析表明它是双星系统中的一员。在这颗蓝色巨星附近有一颗看不见的伴星，不断攫取它的物质，并加热到 1000 万开的高温，从而成为强大的 X 射线源。蓝色巨星和看不见的伴星之间只有 3000 万千米的距离，绕转周期 5.6 天，X 射线发射区范围只有 1000 千米。不可见伴星的质量经反

复测定，估计为 10~15 太阳质量，初步断定为黑洞。这是第一个被发现的，也是具有最大可信度的恒星级黑洞（见图 15）。

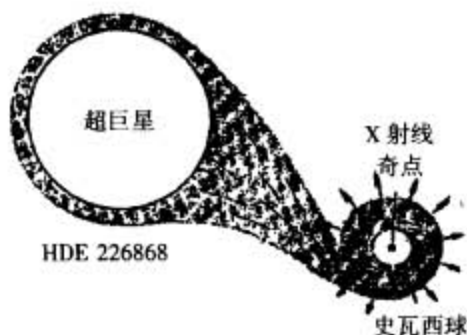
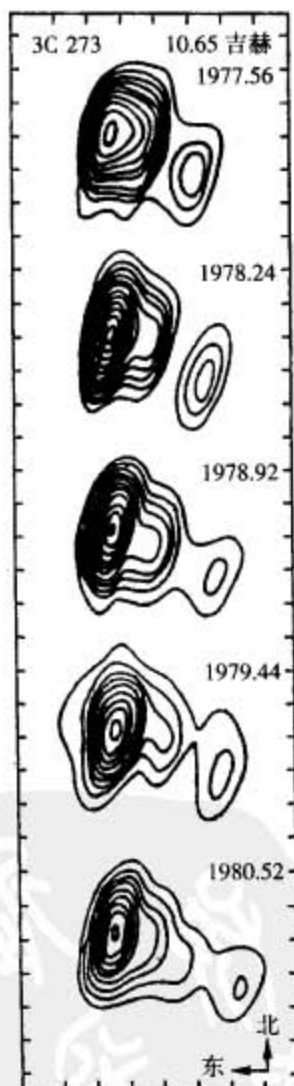


图 15 恒星级黑洞——天鹅座 X-1

- 2 超光速源 (superluminal source)。现代的洲际甚长基线干涉测量（参看第 2 章相关译注）能观测到类星体和射电星系的精细结构，小到只有几光年。通过这种观测，在 20 世纪 70 年代发现了 3C 345 等几个类星体的两个致密射电子源以很高的速度分离。由于类星体的距离极其遥远，两子源向外膨胀的速度超过光速！这种现象乍一发现，自然引起了轰动。人们甚至怀疑狭义相对论关于光速不可逾越的原理和哈勃定律反映的宇宙学红移的观念。现在天文学家已认识到超光速运动并不是物质的真实运动，因而把这种现象称为视超光速运动。

著名的类星体 3C 273 也是其中之一，现以它为例说明之。3C 273 有一个光学喷流，长约 300 光年。该类星体和射电辐射主要来自两部分（即两个子源）——分别称为 3C 273B 和 3C 273A，在光学上 B 对应于 3C 273 的本体，A 接近喷流的端点（见图 16）。1977~1980 年的射电观测表明 A 在远离 B 运动，在 3 年内两者角距增加了 0.002 秒。3C 273 的距离为 31 亿光年，射电喷流的切向速度约为光速的 10 倍！



从 1977 年至 1980 年在频率 1.065×10^{10} 赫上 3C 273 的高分辨率射电图，右下方的射电喷流在远离类星体

图 16 3C 273 的射电喷流远离类星体

现在普遍接受的一种解释认为这是透视的错觉。举一个假想的例子来阐明这个问题，图 17 中 O 表示某类星体核，它喷发出一团相对论性的电子，喷流从 O 点出发移动到相距 r 的 P 点，喷射方向 OP 与视线方向 OQ 之间的夹角为 θ 。类星体本身的速度为 v 。在这种情况下，我们取沿视线为 x 方向，垂直于视线为 y 方向，沿 y 方向的运动速度称为切向速度。沿这两个方向移动的距离 x 和 y 为

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (5.1)$$

天体移动距离 r 所花的时间为

$$t = r/v \quad (5.2)$$

然而，从 P 发出的光线或射电波在传播到观测者之前穿越的距离要比从 O 发出的稍短。从 P 到观测者的路径比从 O 到观测者的路径要短距离 x 。这就是说，从 P 发出的光波到达我们这里比从 O 发出的光波少花 x/c 的时间。因而，从观测者的视角来看，天体从 O 移动到 P 所花的视时间 t_{app} 为

$$t_{\text{app}} = t - x/c$$

把 (5.1) 式和 (5.2) 式代入此式，我们有

$$t_{\text{app}} = (r/v) - (r/c) \cos \theta = (r/v)(1 - \beta \cos \theta) \quad (5.3)$$

这里我们令 $\beta = v/c$ 。于是，通过天空的视速度 v_{app} 为

$$v_{\text{app}} = y/t_{\text{app}} = r \sin \theta / (r/v)(1 - \beta \cos \theta)$$

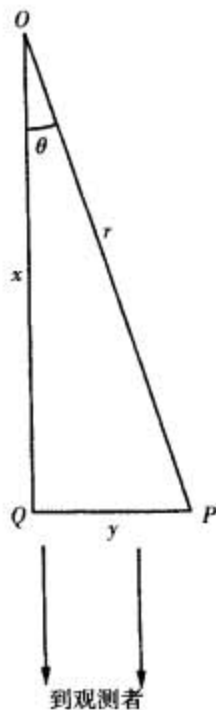
消去 r 得

$$v_{\text{app}} = v \sin \theta / (1 - \beta \cos \theta) \quad (5.4)$$

对于 v 远小于 c 的情况， β 接近于 0，则 v_{app} 约等于 $v \sin \theta$ ，这是所期待的结果。然而，当 v 接近于 c 时， v_{app} 可以大于 v 。事实上， v_{app} 可以远大于 v ，以致超过了 c 。

设这团高速电子在 O 点时沿视线发出的光经 100 年后到达 Q 点，而以接近光速运动的该电子团经 101 年后抵达离 Q 最近的 P 点，且设 $\theta = 8^\circ$ ，则 PQ 相隔 14 光年。由于类星体的距离远大于 100 光年， Q 和 P 到观测者的距离近似相等。许多年之后， Q 点的光传到观测者，而高速电子团在 P 点发出的光仅迟了 1 年也接踵而至。于是，观测者误认为射电源从位置 Q 移到 P 只花了 1 年时间，其切向速度为光速的 14 倍！殊不知实际上从 Q 到 P 经过了 101 年。

从 (5.4) 式可见，把喷流误认为超光速源的关键因素在于类星体的射电喷流的速度 v 接近于光速 c ，即 β 接近于 1，并且喷流的方向与视线相交成不大的角度，即 θ 约等于 0（这时 $\cos \theta$ 约等于 1）。如果射电喷流的速度远小于光速，或者喷流方



当物体从 O 移到 P 引起的超光速运动

图 17 视超光速运动的解释

向与视线的交角很大，譬如在天球切面内，则不会出现视超光速运动。

第6章

- 1 自然界力的统一 (unification of the forces of nature)。当前我们知道自然界存在 4 种基本作用力，总结于表 1 (按照它们强度的次序排列，它们的强度是相对于强核力给出的)。短程力根本上是在核的范围内才起作用。长程力按 $1/r^2$ 衰减，这使得它们的作用能达到遥远的距离。

表 1 力和粒子

力	相对强度	范围	载体
强核力	1	短	π 介子
电磁力	10^{-2}	长	光子
弱核力	10^{-13}	短	W^+ , W^- , Z
引力	10^{-40}	长	引力子 (?)

如表 1 所列，力必须以粒子为载体。光子是电磁力的载体，它们没有静止质量，这一事实导致电磁力是长程力。人们猜测引力相互作用是通过称为引力子的无质量粒子进行的。由于引力与电磁力一样具有长程的性质，所以假定它是无质量的。然而，还从来没有探测到引力子。强作用力是由 π 介子载荷。由于 π 介子有质量，所以强核力是短程力。弱核力也是短程力，它由三种粒子载荷。两种是正负 W 粒子 (即 weak 的首字母)，第三种是中性粒子，称为 Z 粒子。这些粒子比 π 介子质量大得多，因此弱力也是短程力。W 和 Z 两种粒子的质量分别是质子 (1 吉电子伏特) 的 80 倍和 90 倍。

在对粒子和力的各种研究中，对称性起了非常重要的作用。对称性在物理学的许多领域里都很重要。当我们说一个系统具有特殊的对称性，就是指这个系统在经过某种变换以后看起来不变。例如，球对称就是指我们把这个系统绕任何一根通过球心的轴线无论转过多大角度，系统看起来保持原样。

在物理学中，对称性还具有更深刻的重要性。在存在对称性的场合，就存在一些遍及整个问题的常量，也就意味着存在守恒规律。例如，物理定律不会因坐标系的旋转和原点平移而改变，这两个事实分别导致角动量守恒和线动量守恒。物理定律不随时间而改变，这一事实导致能量守恒。

弱相互作用有一个有趣的性质，它不像其他的作用力那样服从所有守恒定律。自然界中有时会遇到这样的情形，本来应该对称的情况却因某种原因导致不对称的

结果。这称为自发对称破缺。但是，只要有足够的能量，就是对称的。

力的统一是要求把所有的力解释成为一个更一般的力在现实情况下的不同表现形式。这个研究并不新鲜。麦克斯韦统一了原先以为截然不同的电力和磁力。这个理论的基础正是自然界存在某些对称性。关于各种作用力的统一的进展示于图 18。

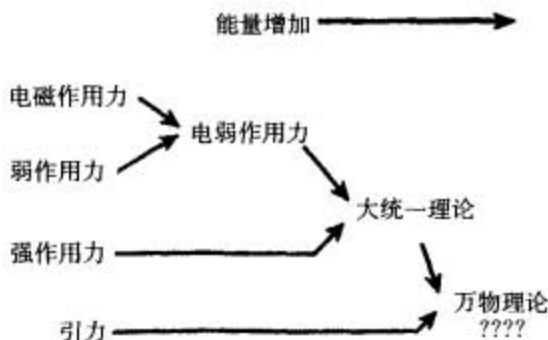


图 18 力的统一。从图的左端往右端看，能量渐次增大，力也逐步统一

近代的进展首先在于把电磁力和弱作用力统一为一种作用力，称为电弱作用力。下一步必须统一强作用力和电弱作用力，从事这一步骤的理论称为大统一理论，简记为 GUT，当前还处于发展阶段。这个力的载体用 X 粒子和 Y 粒子表示，质量估计达 10^{16} 吉电子伏特。这说明当能量远高于 10^{16} 吉电子伏特时，强作用力与电弱作用力之间的差别消失。这样高的能量明显超出了加速器的范围，我们不能指望在地球上建造如此高能的加速器。不过，这样的条件在大爆炸时曾经闪现过。最后一步是，要把引力纳入统一的力中去。这个理论称为超 GUT，或称扩充超引力，或称万物理论 (TOE)。显而易见，其中存在着许多更困难的问题。

- 2 电弱作用力 (electroweak force)。这是电磁作用力与弱作用力统一的结果。在电弱作用力里，光子 (电磁作用力的载体) 与 W 粒子 (或 Z 粒子) (弱作用力的载体) 本质上是相同的。可是，一个质量很大，一个没有质量，两种粒子怎么会是相同的呢？这个问题的答案正揭示了统一的意义。在这种情况下，若我们所面临的这些粒子的能量远大于 W 粒子的质量与光子的质量 (等于 0) 差，那么电磁作用力与弱作用力就显得一样了。在这种高能量的情况下，W 粒子的质量从小的自发对称破缺中产生。其实，只有在能量很低、W 粒子的质量不能忽略的情况下，我们才会重视 W 粒子与光子的质量差。这里反映了“只要能量足够高，自然界就保持对称”的准则。

W 粒子和 Z 粒子的质量约为 80 吉电子伏特 (质量以等价的能量表示，质子的质量约 1 吉电子伏特)。这样的质量勉强才能进入当前最好的粒子加速器里。因此，

我们还无法研究粒子具有高于这个能量的能量范围，从而探测在其中电磁作用力和弱作用力同一的世界。不过，在早期宇宙中一定出现过一个短暂的时候，那时温度足够高，使得这个对称性存在于世。这是粒子物理学与宇宙学之间的一个重要联系。

1967~1968年，谢尔顿·格拉肖、斯蒂文·温伯格和阿伯杜斯·萨拉姆提出了电磁作用力与弱作用力统一的理论。由于这项工作，他们分享了1979年的诺贝尔物理学奖。这个理论的主要成就是，在W粒子和Z粒子发现之前预言了它们的质量，它们正是弱作用力的载体。



参考文献

- Adams, F. C., and G. Laughlin (1997), "A Dying Universe: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects, " *Reviews of Modern Physics* 69, 337-372.
- Allen, C. W. (1991), *Astrophysical Quantities*, Athlone Press.
- Alpher, R., and R. Herman (1948), "Evolution of the Universe, " *Nature* 162, 774-775.
- Anderson, J. L. (1967), *Principles of Relativity Physics*, Academic Press.
- Arkani-Hamed, N., S. Dimopoulos, and G. Dvali (1998), "The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter, " *Physics Letters B* 429, 263-272.
- Baade, W., and R. Minkowski (1954), "On the Identification of Radio Sources, " *Astrophysical Journal* 119, 215.
- Backer, D. C., and R. A. Sramek (1999), "Proper Motion of the Compact, Nonthermal Radio Source in the Galactic Center, Sagittarius A*, " *Astrophysical Journal* 524, 805-815.
- Balberg, S., and S. L. Shapiro (2002), "Gravothermal Collapse of Self-Interacting Dark Matter Halos and the Origin of Massive Black Holes, " *Physical Review Letters* 88, 101301. 1-101301. 4.
- Balick, B., and R. L. Brown (1974), "Intense Sub-arcsecond Structure in the Galactic Center, " *Astrophysical Journal* 194, 265-270.
- Bernstein, H. J., and A. V. Phillips (1981), "Fiber Bundles and Quantum Theory, " *Scientific American* 245, 123-137.
- Binney, J., and S. Tremaine (1987), *Galactic Dynamics*, Princeton University Press.
- Birkhoff, G. (1923), *Relativity and Modern Physics*, Harvard University Press.
- Blandford, R. D., C. F. McKee, and M. J. Rees (1977), "Superluminal Expansion in Extragalactic Radio Sources, " *Nature* 267, 211-216.
- Blandford, R. D., and M. J. Rees (1978), "Extended and Compact Extragalactic Radio Sources. Interpretation and Theory, " *Physica Scripta* 17, 265-274.
- Blandford, R. D., and R. L. Znajek (1977), "Electromagnetic Extraction of Energy from Kerr Black Holes, " *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 179, 433-456.
- Bondi, H. (1980), *Relativity and Common Sense*, Dover.
- Bower, G. A., D. O. Richstone, G. D. Bothun, and T. M. Heckman (1993), "A Search for Dead Quasars Among Nearby Luminous Galaxies. I. The Stellar Kinematics in the Nuclei NGC 2613, NGC 4699, NGC 5746, and NGC 7331, " *Astrophysical Journal* 402, 76-94.
- Bromley, B., F. Melia, and S. Liu (2001), "Polarimetric Imaging of the Massive Black Hole at the

- Galactic Center, *Astrophysical Journal Letters* 555, L83-L87.
- Burbidge, G. R., T. W. Jones, and S. L. Odell (1974), "Physics of Compact Nonthermal Sources III. Energetic Considerations, *Astrophysical Journal* 193, 43-54.
- Carilli, C. L., and P. D. Barthel (1966), "Cygnus A, *The Astronomy and Astrophysics Review* 7, 1-54.
- Chandrasekhar, S. (1931), "The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs, *Astrophysical Journal* 74, 81-82.
- Colbert, E. J. M., and A. F. Ptak (2002), "A Catalog of Candidate Intermediate Luminosity X-Ray Objects, *Astrophysical Journal Supplements* 143, 25-45.
- Cunningham, C. T., and J. M. Bardeen (1973), "The Optical Appearance of a Star Orbiting an Extreme Kerr Black Hole, *Astrophysical Journal* 183, 237-264.
- Damour, T., in *Three Hundred Years of Gravitation*, S. W. Hawking and W. Israel (eds.) (1987), Cambridge University Press, 128-198.
- Davydov, A. S. (1976), *Quantum Mechanics*, Pergamon Press.
- de Bernardis, P., P. A. R. Ade, J. J. Bock, et al. (2000), "A Flat Universe from High Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation, *Nature* 404, 955-959.
- Dicke, R. H., P. J. E. Peebles, P. G. Roll, and D. T. Wilkinson (1965), "Cosmic Black-Body Radiation, *Astrophysical Journal* 142, 414-419.
- Drake, S. (1981), *Cause, Experiment, and Science*, Chicago University Press.
- Duschl, W. J., and H. Lesch (1994), "The Spectrum of Sagittarius A* and its Variability, *Astronomy and Astrophysics* 286, 431-436.
- Eddington, A. S. (1935), "Minutes of a Meeting of the Royal Astronomical Society, *Observatory* 58, 37.
- Eisenstein, D. J., and A. Loeb (1995), "Origin of Quasar Progenitors from the Collapse of Low-spin Cosmological Perturbations, *Astrophysical Journal* 443, 11-17.
- Fabian, A. C., I. Smail, K. Iwasawa, et al. (2000), "Testing the Connection Between the X-ray and Submillimeter Source Populations Using Chandra, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 315, L8-L12.
- Falcke, H., F. Melia, and E. Agol (2000), "Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center, *Astrophysical Journal Letters* 528, L13-L17.
- Fermi, E. (1956), *Thermodynamics*, Dover.
- Ferrarese, L., and D. Merritt (2000), "A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies, *Astrophysical Journal Letters* 539, L9-L12.
- Feynman, R. P., and S. Weinberg (1989), *Elementary Particles and the Laws of Physics*, Cambridge University Press.
- Field, J. v. (1987), *Kepler's Geometrical Cosmology*, University of Chicago Press.
- Fromerth, M. J., and F. Melia (2001), "The Formation of Broad-Line Clouds in the Accretion Shocks of Active Galactic Nuclei, *The Astrophysical Journal* 549, 205-214. (2000), "Determining the Central Mass in Active Galactic Nuclei Using Cross Correlation Lags and Velocity Dispersions, *The Astrophysical Journal* 533, 172-175.
- Gamow, G. (1948), "Evolution of the Universe, *Nature* 162, 680-682.
- Garrett, M., T. W. B. Muxlow, S. T. Garrington, et al. (2001), "AGN and Starbursts at High Redshift: High-Resolution EVN Radio Observations of the Hubble Deep Field, *Astronomy and Astrophysics* 366, L5-L8.
- Gebhardt, K., J. Kormendy, L. C. Ho, et al. (2000), "A Relationship Between Nuclear Black Hole

- Mass and Galaxy Velocity Dispersion, " *Astrophysical Journal Letters* 539, L13-L16.
- Gebhardt, K., R. M. Rich, and L. C. Ho (2002), "A 20, 000 Solar Mass Black Hole in the Stellar Cluster G1, " *Astrophysical Journal Letters* 578, L41-L45.
- Giacconi, R., A. Zirm, J. -X. Wang, et al. (2002), "Chandra Deep Field South: The 1 Ms Catalog, " *The Astrophysical Journal Supplements* 139, 369-410.
- Gillispie, C. C. (1997), *Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: A Life in Exact Science*, Princeton University Press.
- Green, P. J., T. L. Aldcroft, S. Mathur, B. J. Wilkes, and M. Elvis (2001), "A Chandra Survey of Broad Absorption Line Quasars, " *The Astrophysical Journal* 558, 109-118.
- Greene, B. (2000), *The Elegant Universe*, Vintage Books.
- Gundlach, J. H., and S. M. Merkowitz (2000), "Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback, " *Physical Review Letters* 85, 2869-2872.
- Guth, A. (1981), "Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems, " *Physical Review D* 23, 347-358.
- Guthrie, W. K. C. (1962), *A History of Greek Philosophy, Volume I: The Earlier PreSocratics and the Pythagoreans*, Cambridge University Press.
- Gwinn, C. R., R. M. Danen, T. Kh. Tran, J. Middleditch, and L. M. Ozerov (1991), "The Galactic Center Radio Source Shines Below the Compton Limit, " *Astrophysical Journal Letters* 381, L43-L46.
- Haehnelt, M. G., and M. J. Rees (1993), "The Formation of Nuclei in Newly Formed Galaxies and the Evolution of the Quasar Population, " *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 263, 168-178.
- Hanany, S., E. Ade, A. Balbi, et al. (2000), "MAXIMA-1: A Measurement of the Cosmic Microwave Background Anisotropy on Small Angular Scales, " *Astrophysical Journal Letters* 545, L5-L8.
- Hawking, S. W. (1974), "Black Hole Explosions?" *Nature* 248, 30.
- Hollywood, J. M., and E. Melia (1995), "The Effects of Redshifts and Focusing on the Spectrum of an Accretion Disk in the Galactic Center Black Hole Candidate Sgr A*, " *Astrophysical Journal Letters* 443, L17-L21. (1997), "General Relativistic Effects on the Infrared Spectrum of Thin Accretion Disks in AGNs; Application to Sgr A*, " *Astrophysical Journal Supplements* 112, 423-455.
- Hollywood, J. M., F. Melia, L. M. Close, D. W. McCarthy, Jr., and T. A. Dekeyser (1995), "General Relativistic Flux Modulations in the Galactic Center Black Hole Candidate Sgr A*, " *Astrophysical Journal Letters* 448, L21-L25.
- Hoyle, F., and G. R. Burbidge (1966), "On the Nature of the Quasi-Stellar Objects, " *Astrophysical Journal* 144, 534.
- Junor, W., J. A. Biretta, and M. Livio (1999), "Formation of the Radio Jet in M87 at 100 Schwarzschild Radii from the Central Black Hole, " *Nature* 401, 891-892.
- Kerr, R. P. (1963), "Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics, " *Physical Review Letters* 11, 237-238.
- Khokhlov, A., and F. Melia (1996), "Powerful Ejection of Matter from Tidally Disrupted Stars Near Massive Black Holes and a Possible Application to Sgr A East, " *Astrophysical Journal Letters* 457, L61-L64.
- Kormendy, J., and D. Richstone (1995), "Inward Bound-The Search for Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei, " *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 33, 581-624.

- Landau, L. D. (1932), "On the Theory of Stars," *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* 1, 285-288.
- Lee, H. C. (1984), *An Introduction to Kaluza-Klein Theories*, World Scientific.
- Linde, A. (1990), *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Harwood Academic Publishers.
- Liu, S., and F. Melia (2001), "New Constraints on the Nature of Radio Emission in Sagittarius A*," *The Astrophysical Journal Letters* 561, L77-L80.
- (2002), "An Accretion Induced X-Ray Flare in Sagittarius A*," *The Astrophysical Journal Letters* 566, L77-L80.
- Longair, M. S., M. Ryle, and P. A. G. Scheuer (1973), "Models of Extended Radio Sources," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 164, 243.
- Lynden-Bell, D. (1969), "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars," *Nature* 223, 690.
- Lynden-Bell, D., and M. J. Rees (1971), "On Quasars, Dust and the Galactic Centre," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 152, 461.
- Lynden-Bell, D., and R. Wood (1968), "The Gravitational Catastrophe in Isothermal Spheres and the Onset of Red-giant Structure for Stellar Systems," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 138, 495.
- Mach, E. (1893), *The Science of Mechanics*, trans. by T. J. McCormack, 2nd edn, Open Court Publishing Co.
- Malizia, A., L. Bassani, A. J. Dean, et al. (2001), "Hard X-Ray Detection of the High Redshift Quasar 4C 71. 07," *The Astrophysical Journal* 531, 642-646.
- Martini, P., and R. W. Pogge (1999), "Hubble Space Telescope Observations of the CFA Seyfert 2 Galaxies: The Fueling of Active Galactic Nuclei," *Astronomical Journal* 118, 2646-2657.
- Matsumoto, H., et al. (2001), "Discovery of a Luminous, Variable, Off-Center Source in the Nucleus of M82 with the Chandra High-Resolution Camera," *Astrophysical Journal Letters* 547, L25-L28.
- Maxwell, J. C. (1954), *Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol. II, Dover Publications.
- McKellar, A. (1941), "The Problems of Possible Molecular Identification for Interstellar Lines," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 53, 233-235.
- Melia, E. (1992), "An Accreting Black Hole Model for Sagittarius A*," *The Astrophysical Journal Letters* 387, L25-L29.
- (2001), *Electrodynamics*, The University of Chicago Press.
- (2001), "X-ray from the Edge of Infinity," *Nature* 413, 25-26.
- (2003), *The Black Hole at the Center of our Galaxy*, Princeton University Press.
- Melia, F., B. C. Bromley, S. Liu, and C. K. Walker (2001), "Measuring the Black Hole Spin in Sagittarius A*," *The Astrophysical Journal Letters* 554, L37-L40.
- Melia, F., and H. Falcke (2001), "The Supermassive Black Hole at the Galactic Center," *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 39, 309-352.
- Merrifield, M. R., D. A. Forbes, and A. I. Terlevich (2000), "The Black Hole Mass-galaxy Age Relation," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 313, L29-L32.
- Merritt, D., and L. Ferrarese (2001), "Black Hole Demographics from the M-Sigma Relation," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 320, L30-L34.
- Michelson, A. A., and E. W. Morley (1887), "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether," *American Journal of Science* 34, 333-345.
- Mihalas, D., and B. Weibel-Mihalas (1984), *Foundations of Radiation Hydrodynamics*, Oxford University Press.

- Miller, A. D., et al. (1999), "A Measurement of the Angular Power Spectrum of the CMB from $l = 100$ to 400," *Astrophysical Journal Letters* 524, L1-L4.
- Misner, C. W., K. S. Thorne, and J. A. Wheeler (1973), *Gravitation*, W. H. Freeman and Co.
- Miyoshi, M., J. Moran, J. Herrnstein, et al. (1995), "Evidence for a Black Hole from High Rotation Velocities in a Sub-Parsec Region of NGC 4258," *Nature* 373, 127.
- Moore, P. (1996), *The Planet Neptune, An Historical Survey Before Voyager*, Praxis-Wiley.
- Morrison, P. "Are Quasi-Stellar Radio Sources Giant Pulsars?" *Astrophysical Journal* 157, L73.
- Mushotzky, R. F., L. L. Cowie, A. J. Barger, and K. A. Arnaud (2000), "Resolving the Extragalactic Hard X-ray Background," *Nature* 404, 459-464.
- Newton, I. (1966), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, trans. by Andrew Motte, revised and annotated by F. Cajori, University of California Press.
- Oppenheimer, J. R., and H. Snyder (1939), "On Continued Gravitational Contraction," *Physical Review* 56, 455-459.
- Osterbrock, D. E. (2001), *Walter Baade: A Life in Astrophysics*, Princeton University Press.
- Ostriker, J. P., and P. J. Steinhardt (2001), "Brave New Cosmos: The Quintessential Universe," *Scientific American* 284, 47-53.
- Parker, E. N. (1979), *Cosmical Magnetic Fields*, Oxford University Press.
- Penrose, R. (1969), "Gravitational Collapse, the Role of General Relativity," *Rivista Nuovo Cimento* 1 Numero Speciale, 252.
- Penzias, A. A., and R. W. Wilson (1965), "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s," *Astrophysical Journal* 142, 419-421.
- Perlmutter, S., G. Aldering, G. Goldhaber, et al. (1999), "Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae," *The Astrophysical Journal* 517, 565-586.
- Pound, R. V., and G. A. Rebka (1960), "The Apparent Weight of Photons," *Physical Review Letters* 4, 337-341.
- Quinlan, G. D., and S. L. Shapiro (1990), "The Dynamical Evolution of Dense Star Clusters in Galactic Nuclei," *Astrophysical Journal* 356, 483-500.
- Rees, M. J. (1966), "Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources," *Nature* 211, 468-470.
- (1971), "New Interpretation of Extragalactic Radio Sources," *Nature* 229, 312 and 510.
- (1988), "Tidal Disruption of Stars by Black Holes of 10^6 to 10^8 Solar Masses in Nearby Galaxies," *Nature* 333, 523-528.
- Reid, M. J., A. C. S. Readhead, R. C. Vermeulen, and R. N. Treuhaft (1999), "The Proper Motion of Sagittarius A*. I. First VLBA Results," *Astro-physical Journal* 524, 816-823.
- Rybicki, G. B., and A. P. Lightman (1979), *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley and Sons.
- Sakurai, J. J. (1964), *Invariance Principles and Elementary Particles*, Princeton University Press.
- Salpeter, E. E. (1964), "Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects," *Astrophysical Journal* 140, 796-800.
- Scheuer, P. A. G. (1974), "Models of Extragalactic Radio Sources with a Continuous Energy Supply from a Central Object," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 166, 513-528.
- Schmidt, B. P., N. B. Suntzeff, M. M. Phillips, et al. (1998), "The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae," *The Astrophysical Journal* 507, 46-63.
- Schmidt, M. (1963), "3C 273: A Star-like Object with Large Red-shift," *Nature* 197, 1040.

- Schödel, R., T. Ott, R. Genzel, *et al.* (2002), "A Star in a 15. 2-year Orbit Around the Supermassive Black Hole at the Centre of the Milky Way," *Nature* 419, 694-696.
- Shai, A., M. Livio, and T. Piran (2000), "Tidal Disruption of a Solar-Type Star by a Supermassive Black Hole," *Astrophysical Journal* 545, 772-780.
- Shapiro, S. L., and S. A. Teukolsky (1992), "Black Holes, Star Clusters, and Naked Singularities: Numerical Solution of Einstein's Equations," *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering* 340, 365-390.
- Silk, J., and M. J. Rees (1998), "Quasars and Galaxy Formation," *Astronomy and Astrophysics* 331, L 1-L4.
- Smoot, G. F., and K. Davidson (1993), *Wrinkles in Time*, William Morrow.
- Starobinsky, A. A. (1980), "A New Type of Isotropic Cosmological Models without Singularity," *Physics Letters B* 91B, 99-104.
- Steinberg, J. L., and J. Lequeux (1963), *Radio Astronomy*, McGraw-Hill.
- Strohmayer, T. E. (2001), "Discovery of a 450 Hz QPO from the Microquasar GRO 11655-40 with RXTE," *Astrophysical Journal Letters* 552, 49-53.
- Stubbs, P. (1971), "Red Shift Without Reason," *New Scientist* 50, 254-255.
- Thorne, K. S. (1995), *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Norton and Co.
- Thorne, K. S., R. H. Price, and D. A. Macdonald (1986), *Black Holes: The Membrane Paradigm*, Yale University Press.
- Tolman, R. C. (1987), *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*, Dover Publications.
- Umemura, M., A. Loeb, and E. L. Turner (1993), "Early Cosmic Formation of Massive Black Holes," *Astrophysical Journal* 419, 459.
- van der Marel, R. R., "Structure of the Globular Cluster M15 and Constraints on a Massive Central Black Hole," in *Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei*, L. Kaper, E. P. J. van den Heuvel, and P. A. Woudt (eds.) (1999), 246, Springer.
- Wald, R. (1984), *General Relativity*, University of Chicago Press.
- Wardle, J. F. C., D. C. Homan, R. Ojha, and D. H. Roberts (1998), "Electron-Positron Jets Associated with the Quasar 3C 279," *Nature* 395, 457-461.
- Weber, J. (1969), "Evidence for Discovery of Gravitational Radiation," *Physical Review Letters* 22, 1320-1324.
- Weinberg, S. (1972), *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley and Sons.
- (1977), *The First Three Minutes*, Basic Books.
- Westfall, R. (1981), *Never at Rest*, Cambridge University Press.
- Wheeler, J. A. (1999), *Journey into Gravity and Spacetime*, Freeman and Co.
- Williams, R. E., B. Blacker, M. Dickinson, *et al.* (1996), "The Hubble Deep Field: Observations, Data Reduction, and Galaxy Photometry," *Astronomical Journal* 112, 1335.
- Wilms, J., C. S. Reynolds, M. C. Begelman, *et al.* (2001), "XMM-EPIC Observation of MCG-6-30-15: Direct Evidence for the Extraction of Energy from a Spinning Black Hole?" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328, L27-L31.
- Zel'dovich, Ya. B., and I. D. Novikov (1967), "The Hypothesis of Cores Retarded During Expansion and the Hot Cosmological Model," *Soviet Astronomy* 10, 602.
- Zel'dovich, Ya. B., and M. A. Podurets (1965), "The Evolution of a System of Gravitationally Interacting Point Masses," *Astronomicheskii Zhurnal* 42, 963.
- Zensus, J. A., and T. J. Pearson (1987), *Superluminal Radio Sources*, Cambridge University Press.

索引

注:各条目后的页码均为原书页码,即本书边码。

3C 273 2, 3, 6, 7, 17, 30, 77, 92

3C 279 103, 104

A

absolute zero temperature 绝对零度 66

accelerating universe 加速宇宙 36

accretion disks 吸积盘 25

accretion disk simulation 吸积盘模拟 23

accretion plasma 等离子体吸积 20

acoustic fluctuations 声学涨落 71

action at a distance 超距作用 34

active galactic nuclei 活动星系核 11, 13~14, 29

Adams, John Couch 约翰·库奇·亚当斯 35

adaptive optics 自适应光学 31

Advanced X-ray Astrophysics Facility 高级X射线
天体物理卫星 6

Albert Einstein Institute 阿尔伯特·爱因斯坦研究
所 83, 84

ALMA 阿塔卡马毫米波/亚毫米波大天线阵 117

Alpher, Ralph 拉尔夫·阿尔弗 66

Andromeda 仙女星系 12, 13, 15, 18, 10, 21,

32, 74, 79, 85, 98, 104

angular resolution 角分辨率 118

Antennae galaxies 触须星系 21, 76

antimatter 反物质 103, 132

ANTU ANTU 望远镜 76

apertures 口径 98

aponigricon 远黑洞点 33

ARISE 地空高级射电干涉测量 99, 116

asteroids 小行星 129

Atacama desert 阿塔卡马沙漠 117

ATT 92~93 94

automobile sparks 汽车火花 96

B

B++ mechanism B++机制 107

Baade, Walter 沃尔特·巴德 97, 104

balloon flights 气球飞行 124

beginning 开端 120

Bell Labs 贝尔实验室 67, 92~93, 94

Berkeley 伯克利 12

Berlin 柏林 84

Berlin Academy 柏林科学院 53
 Bernstein, Herbert J. 47
 Big Bang 大爆炸 4, 12~13, 64, 70, 72, 78, 111, 114~115, 124, 129
 Bio-Bio river 比奥-比奥河 31
 Biletta, John 107
 Birkhoff's theorem 伯克霍夫定律 22~24
 Birkhoff, George 乔治·伯克霍夫 122
 black holes 黑洞 1, 11, 13, 17, 20, 27, 52, 133
 binary 双黑洞 83
 evaporation 蒸发 133
 formation 形成 63
 mass 质量 19
 spacetime 时空 34
 spin 自转 100
 voltage 电势 61
 Blandford, Roger 罗杰·勃兰德福特 60, 102, 109
 blueshift 蓝移 3
 Bolton, John 约翰·波尔顿 2
 BOOMERanG experiment 河外毫米波辐射和地磁气球观测 71, 124~25
 Bose-Einstein Condensation 玻色-爱因斯坦凝聚 50
 bosons 玻色子 48
 bounded space 束缚空间 39
 Brandt, William N. 威廉·N·布兰特 113
 Burbidge, Geoffrey R. 101

C

CALTECH 加州理工学院 65, 117, 125
 Canada 加拿大 108

Canes Venatici 猎犬座 27
 Capetti, Alessandro 15
 carbon 碳 45
 Carnegie Mellon University 卡内基·梅隆大学 90
 Cash, Webster 119
 cause and effect 原因和影响 127
 CDF 钱德拉深空场 112
 Centaurus 半人马座 15
 Centaurus A 半人马座 A 15~16, 77, 100, 106
 CERN 欧洲核子研究中心 44
 Chandra Deep Field 钱德拉深空场 112
 Chandra telescope 钱德拉望远镜 6, 13, 15, 78, 82, 90, 113, 115, 117
 Chandrasekhar, Subrahmanyan 苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 6
 charges 电荷 132
 Chicago 芝加哥 51
 clusters 星团 17
 CMVA 协调毫米波 VLBI 阵 116
 coalescing black holes 结合黑洞 84
 COBE 宇宙背景探测卫星 69~70
 Colbert, Edward, 90
 compression 压缩 3, 24, 45
 Compton Gamma-Ray Observatory 康普顿 γ 射线天文台 8
 computer simulations 计算机模拟 86
 constellations 星座 3, 8, 11, 15, 19, 17, 93, 94, 95, 96, 106
 Constellation-X X星座 118
 contour maps 等强度线图 96
 Copernicus, Nicolaus 尼古拉·哥白尼 15
 correlator 相关器 97
 Corvus 乌鸦座 11
 cosmic flashlight 宇宙闪光 24

cosmic microwave background radiation 宇宙微波背景辐射 64~65, 67, 68, 124
 cosmological fluctuations 宇宙学涨落 68~70, 72
 cosmology 宇宙学 26, 68, 123
 creation of particles 粒子创生 132
 cross-registration 相互认证 96
 Curts, Heber 黑伯·柯蒂斯 104, 105
 cyclones 旋风 20, 23
 Cygnus 天鹅座 96
 Cygnus A 天鹅座 A 15, 16, 77, 96~97, 101, 106
 Cygnus X-1 天鹅座 X-1 14

D

Damour, Thibault 85
 dark age 黑暗时代 78
 dark energy 暗能量 36
 dark mass 暗质量 106
 dark matter 暗物质 73, 68
 Davidson, Kris, 69
 Davis, Marc 马克·戴维斯 12
 de Bernardis, Paolo 保罗·德·贝尔纳尔迪斯 114
 Deep Space Network 深空网 112
 density of matter 物质密度 125
 detectors 探测器 119
 diamonds 金刚石 130
 diatomic molecules 双原子分子 66
 Dicke, Robert H. H·罗伯特·迪克 68
 dilution of gravity 引力的稀释 41
 dimension defined 定义的维 39
 Dimopoulos, Savas 42
 disk simulations 盘的模拟 23
 Dominion Astrophysical Observatory 多米尼翁天体

物理台 66

Doppler shift 多普勒漂移 59, 70
 Dvali, Gia 41
 Dwingeloo 德温格洛 112
 dying universe 死亡中的宇宙 130
 dynamos 发电机 60

E

early universe 早期宇宙 71, 120
 Earth atmosphere 地球大气 19, 117
 echoes of the Big Bang 大爆炸的回声 70
 Eckart, Andreas 31
 edge of the universe 宇宙边缘 3, 10, 12
 Effelsberg 11
 Einstein, Albert 阿尔伯特·爱因斯坦 1, 4~5, 40
 electricity 电 60
 electromagnetic force 电磁(作用)力 35
 electron degeneracy 电子简并 50
 electrons 电子 127
 electrostatic induction 静电感应 60
 electroweak force 电弱(作用)力 117, 128
 elliptical galaxies 椭圆星系 75
 energy 能量 126, 131~133
 Eot-Wash laboratory 爱奥特-瓦什实验室 43
 European Southern Observatory 欧洲南方天文台 31
 European Space Agency 欧洲空间局 58
 European VLBI 欧洲 VLBI 112
 event horizons 视界 10, 17, 55, 92, 99, 106, 131~133
 EVN 欧洲 EVN 网 112
 expanding universe 膨胀宇宙 123
 expansion of space 空间膨胀 113
 extra dimensions 额外的维数 38, 41,

43~44, 117

F

Fabian, Andrew C. 115
Falcke, Heino 116
Faraday, Michael 米歇尔·法拉第 60~61
Fermi National Accelerator 国立费米加速器 12
fermions 费米子 48
Ferrarese, Laura 79
fireballs 火球 66
fluctuations 涨落 131
flywheels 飞轮 61
Forbes, Duncan A. 18
forces 力, 作用力 35
four-dimensional space 四维空间 40
Friedan, Betty 贝蒂·弗里丹 1
fundamental constants 基本常数 125
fundamental particles 基本粒子 130
future directions 未来的方向 115
fuzziness 模糊度 125~126, 128, 131

G

G1 globular cluster G1 球状星团 74
galactic bulges 星系核球 79
galactic center 星系中心 30, 32, 93, 98, 101, 117
galaxies 星系
galaxies collisions 星系碰撞 11, 82, 85, 86
galaxies formation 星系形成 63, 81
galaxies mergers 星系并合 74, 76
galaxies types 星系类型 74

Galilei, Galileo 伽利略·伽利莱 34
galvanometers 电流计 60
gamma rays γ 射线 8
Gamow, George 乔治·伽莫夫 66
Garrett, Michael 112
Gebhardt, Karl 74, 80
general relativity 广义相对论 1, 122, 131
generators 发电机 60
Genzel, Reinhard 31
Ghez, Andrea 32
Giacconi, Riccardo 里卡尔多·贾科尼 113
Glashow, Sheldon 谢尔顿·格拉肖 127
globular clusters 球状星团 74, 75
Grand Unified Theory 大统一理论 127~128, 129
gravis 重 34
gravitas 重量 34
gravitation 引力, 重力 26
gravitation acceleration 引(重)力加速度 54
gravitational collapse 引力坍缩 45
gravitational force 引力, 重力 36
gravitational waves 引力波 82~83, 84~85, 115, 122~123
gravity 重力 34, 36, 60
Great Britain 大不列颠, 大英帝国 1
Great Depression 经济危机 95
Green, Paul J. 115
Greene, Brian 41
Gundlach, Jens 简斯·袁德拉奇 43
GUT 大统一理论 参见 *Grand Unified Theory*
Guth, Alan 72

H

HALCA 前沿通讯和天文学高级实验室 99

Harvard-Smithsonian Center 哈佛-史密松中心 90
 Hawaii 夏威夷 18, 98
 Hawking radiation 霍金辐射 132
 Hayes Helen 海伦·海斯 4
 Haystack Observatory 海斯塔克天文台 98, 116
 Hazard, Cyril 西里尔·哈扎德 2
 HDF 哈勃深空场 111, 112
 Hearst, William Randolph 赫斯特·威廉·兰多夫 4
 Heinrich-Hertz telescope 海因里希·赫兹望远镜 17
 heliostatic cosmology 日心宇宙 25
 helium 氦 45
 Herman, Robert 66
 Hierarchy Problem 等级问题 37, 42~43, 56
 high temperatures 高温 127
 Hollywood 好莱坞 4
 Hoyle, Fred 弗雷德·霍伊尔 101
 Hubble Deep Field 哈勃深空场 111~112
 Hubble sequence 哈勃序列 75
 Hubble Space Telescope 哈勃空间望远镜 3, 6, 9, 10, 15, 22, 31, 63, 108
 Hubble, Edwin 爱德温·哈勃 3, 4, 5, 104
 human perception 人类感知 129
 Huntington Library 亨丁顿图书馆 5
 Hutchings, John 约翰·赫金斯 9
 hydroelectricity 水力发电 60
 hydrogen 氢 3
 hydrogen maser clock 脉泽钟 98
 hyperspace 多维空间 42, 120

I

IC 2163 87

indistinguishability of particles 粒子的不可区分性

49

infalling gas 下落的气体 16, 15
 infinite space 无限空间 39
 inflationary cosmology 暴胀宇宙学 71
 interferometry 干涉测量 18, 77, 97, 112
 inverse-square law 平方反比律 17
 iron 铁 45
 irregular galaxies 不规则星系 75

J

Jansky, Karl 卡尔·央斯基 93, 94
 Jansky's merry-go-round 央斯基的旋转木马 93
 Jet Propulsion Laboratory 喷气推进实验室 99
 jets 喷流 15, 16, 58, 99, 102~103, 104, 105, 107~110
 jets formation 喷流形成 101
 Johns Hopkins University 约翰·霍普金斯大学 90
 Junor, William 107
 Jupiter 木星 26

K

Kaluza, Theodor 戴奥多尔·卡鲁扎 40
 Kaluza-Klein bottle 卡鲁扎-克莱因瓶 41
 Keck telescope 凯克望远镜 12, 32
 Kennedy, John F. 约翰·F·肯尼迪 1
 Kenya 肯尼亚 1
 Kepler, Johannes 约翰内斯·开普勒 25, 26, 28, 31
 Kerr, Roy, 罗伊·克尔 1, 56~57
 Klein, Oskar 奥斯卡·克莱因 41

Kormendy, John 约翰·科门迪 79

L

Lange, Andrew 安德烈·兰日 124

laser interferometers 激光干涉仪 85

Latini 拉丁人 34

Laughlin, Gregory 130

Le Verrier, Jean Joseph 让·约瑟夫·勒威耶 35

lenticular galaxies 透镜星系 75

Lick Observatory 立克天文台 104~105

life 生命 129

light bending 光线弯曲 2

light-horizon constraint 光视界约束 71

light-year 光年 6

Lincolnshire 林肯郡 26

Linde, Andrei 65, 72

LISA 空间激光干涉天线 85, 115

Liu, Siming 116

Livio, Mario 107

Los Angeles 洛杉矶 99

Levell Telescope 洛威尔望远镜 112

lunar orbit 月球轨道 20

Lynden-Bell, Donald 8, 73

M

M104 76

M15 globular cluster M15 球状星团 74

M82 13

M87 104~106, 108~109

Duccio Macchetto 15

Macdonald, Douglas A. 131

magnetic field 磁场 101, 107

magnetism 磁 60

magnets 磁铁 37

Malizia, Angela 8

Mapuche people 马普切人 31

Marcel Grossmann Meeting 马塞尔·格罗斯曼会议
43

Marconi, Alessandro 15

Marconi, Guglielmo 古列尔莫·马可尼 92

Mars 火星 26, 121

Martini, Paul 21

masers 脉泽 27, 29

MAT 移动各向异性望远镜 71

Matsumoto, Hironori 14

Mauna Kea 莫纳基亚山 98

MAXIM 微角秒X射线成像计划 118, 119

MAXIMA 71

MCG-6-30-15 58~61, 69, 83

McKee, Chris 109

McKellar, Andrew 安德烈·麦克凯勒 66~67

Melia, Fulvio 弗尔维奥·梅利亚 99, 116

Mercury 水星 26, 31

meridian 子午线 93

Merkowitz, Stephen 43

Merrifield, Michael R. 18

Merritt, David 79

Messier, Catalogue 梅西叶星云星团表 75

Messier, Charles 沙尔勒·梅西叶 13, 75, 104

Metrics 度规 53

middleweight black holes 中等质量黑洞 89

Milky Way 银河 10, 13, 20~21, 32, 58, 79,
85, 93, 104~105

millimeter VLBI 毫米波VLBI 116

mini-spirals 微型旋涡 22

Minkowski, Rudolph 鲁道夫·闵可夫斯基 104
 molecular rotation 分子转动 66
 molecular vibration 分子振动 66
 Moon 月球 2, 6, 111
 Morris, Mark 32
 Morrison, Philip 102
 Mount Graham 格拉哈姆山 117
 Mount Wilson 威尔逊山 4
 multiply connected space 多方相联空间 40
 Mushotzky, Richard 78

N

naked singularity 裸奇点 8
 NASA 美国宇航局 9, 13, 58, 119
 National Science Foundation 美国国家科学基金 27
 Neptune 海王星 7, 35
 neutrons 中子 48, 51, 127, 130
 neutron stars 中子星 57, 119
 New General Catalog 星云星团新总表 27
 New York Times 《纽约时报》 93
 Newton, Sir Isaac 艾萨克·牛顿爵士 20, 30, 31
 NGC 2207 87
 NGC 153 90, 91
 NGC 4158 27~28, 30, 33, 98
 NGC 5728 24
 NGC 6240 82~83
 NGC 7052 19~21
 NICMOS 15
 nitrogen 氮 45
 Nobel Prize 诺贝尔奖 5~6, 27, 68, 113, 117
 Novikov, Igor D. 8
 NRAO 美国国立射电天文台 94, 105, 112
 nuclear burning 核燃烧 129

nuclei 核 14

O

Ohio State University 俄亥俄州大学 22, 115
 one-dimensional space 一维空间 40
 optical telescopes 光学望远镜 118
 orientation effect in 3D 三维空间内的定向效应 46, 49
 Ostriker, Jeremiah P 36
 oxygen 氧 45

P

parallel universes 平行宇宙 92, 96
 Paranal Observatory 帕拉那尔天文台 10, 15, 76
 Parkes telescope 帕克斯望远镜 2
 particles 粒子
 particle creation 粒子创生 132
 particle physics 粒子物理学 129
 particle spin 粒子自旋 8
 Pearson, Timothy 103
 Penzias, Arno 阿尔诺·彭齐亚斯 67
 perenigricon 近黑洞点 33
 Perlmutter, Saul 125
 Philippine wine dance 菲律宾葡萄酒舞蹈 47
 Phillips, Anthony V 47
 photon 光子 12, 127, 131~132
 pion π 介子 130
 Planck 普朗克
 Planck constant 普朗克常数 126~127
 Planck energy 普朗克能量 38
 Planck era 普朗克时期 127, 118

Plank length 普朗克长度 126
 Plank time 普朗克时间 121, 125~126, 131
 planets 行星 25~26, 37, 119
 Pluto 冥王星 31, 33
 Pogge, Richard 21
 polyhedra 多面体 25
 positrons 正电子 130
 Potsdam 波茨坦 83
 Price, Richard H. 131
 primordial matter 原始物质 129
 primordial seeds 原始种子 64
 primordial temperature 原始温度 128
 Princeton University 普林斯顿大学 67
 protons 质子 127
 proton decay 质子衰减 130
 PSR 1913+16 84
 Ptak, Andrew 90
 pulsar 脉冲星 84

Q

QSO 1229+204 9, 82~83
 quanta 量子 131~131
 quantized spin 量子化自旋 48
 quantum fluctuation 量子涨落 132
 quantum mechanics 量子力学 48~49, 115, 128, 131
 quantum scale 量子尺度 127
 quarks 夸克 51, 128
 quasars 类星体 3, 6, 8, 9, 11, 16, 89, 108, 114~115
 age 年龄 18
 birth 诞生 63

environment 环境 10
 host galaxies 寄主星系 10, 18, 29, 63

R

radar 雷达 59, 96
 radiation 辐射 132~133
 radio 射电 (无线电)
 astronomer 天文学家 96
 catalogues 星表 96
 cores 核 101
 dishes (碟状) 天线 116~117, 119
 interferometry 干涉测量 116
 power 功率 101
 telescopes 望远镜 2, 27, 109, 116, 119
 universe 宇宙 97
 voice transmission 无线电声讯传输 93
 waves 波 97
 Rebert, Grote 格罗特·雷伯 95
 redshift 红移 3, 4, 104
 Rees, Martin 马丁·里斯 73, 81, 102, 109
 relativistic plasma 相对论性等离子体 100
 ejection 喷射 92, 96
 Richstone, Doug 赛格·里奇斯通 79
 Riemann, Georg 格奥尔格·黎曼 40
 ROSAT 伦琴射线卫星 90
 Rosenfeld, Léon 列昂·罗森费尔德 66
 Rutgers University 鲁特杰斯大学 79

S

S2 32, 33

- Sagittarius 人马座 93
- Sagittarius A* 人马座 A* 30, 31, 33, 78
- Salam, Abdus 阿布都斯·萨拉姆 127
- Salpeter, Edwin 8
- Sanskrit 梵文 34
- satellites 卫星 26, 58
- Schmidt, Brian P. 125
- Schmidt, Marten 马丁·施米特 1, 3, 30
- Schreier, Ethan 15
- Schutz, Bernard 伯纳德·舒茨 83
- Schwarzschild, Karl 卡尔·史瓦西 52
- Schwarzschild metric 史瓦西度规 54, 57, 60, 122
- Schwarzschild radius 史瓦西半径 55, 106, 121
- Schwarzschild spacetime 史瓦西时空 53~54
- Shapiro, Stuart L. 73
- Shapley, Harlow 哈洛·沙普利 104
- Shapley-Curtis debate 沙普利-柯蒂斯辩论 104
- shortwave links 短波联系 93
- sidereal time 恒星时 93
- Silk, Joseph 81
- singularities 奇点 38
- Sloan Digital Sky Survey 斯隆数字巡天 12~13, 113
- Smith, F.Graham 97
- Smoot, George F. 69
- Socorro 索科罗 28, 98
- solar system 太阳系 7, 106
- sonic horizon 声视界 71
- sound waves 声波 13
- Space Shuttle 航天飞机 6
- Space Telescope Science Institute 空间望远镜科学研究所 107
- Space VLBI 空间 VLBI 99
- spacetime 时空 53, 61
- special relativity 狭义相对论 53, 104, 109
- speeding car 超速汽车 59
- spheroidal distribution 球状分布 81
- spin temperature 自旋温度 67
- spinning black holes 自转黑洞 1, 56, 57
- spinning tops 转动着的球 48
- spiral galaxies 旋涡星系 75
- St Croix 圣克鲁克斯 98
- star S2 S2 星 31, 33
- Starobinsky, Alexey A. 72
- static 天电干扰 93
- steady state universe 稳恒态宇宙 65
- Steinhardt, Pauly J. 36
- string theory 弦理论 41
- strong force 强(作用)力 128
- structure formation 结构形成 78
- Sun 太阳 4, 45, 104, 119, 111
- superluminal motion 超光速运动 103, 109~110
- superluminal sources 超光速源 103
- supermassive black holes 特大质量黑洞 8, 13, 17, 19, 21, 22, 27, 32, 57, 72, 96, 102, 130
- density 密度 113
- supernova 超新星 89
- Swings, Pol 保尔·斯温斯 66
- synchrotron radiation 同步加速辐射 101
- T**
- telephone company 电话公司 92

telescopes 望远镜 117
 Telstar satellite “远星”通讯卫星 67
 Terlevich, Alejandro I. 18
 thermodynamics 热力学 65
 thermometers 温度计 67
 Thome, Kip S. 131
 three-dimensional space 三维空间 39, 44, 49
 Tiber river 台伯河 34
 time machines 时间机器 12
 Titanic 泰坦尼克号 92
 Tokyo 东京 99
 Tolman, Richard 65
 topology of 3-space 三维空间的拓扑性质 46
 torsion balances 扭秤 43
 total collapse 完全坍缩 44~46
 Townes, Chares 查尔斯·汤因斯 27
 twinkle 闪烁 31
 two-dimensional space 二维空间 39
 Type-2 quasar 2型类星体 114

U

UK 英国 108
 ultimate fate 终极命运 129
 ultraluminous X-ray source 特高光度X射线源 89, 91
 uncertainty principle 测不准原理 116
 universal expansion 宇宙膨胀 12, 36, 64
 universal glow 宇宙辉光 113
 University College London 伦敦大学 114
 University of Cambridge 剑桥大学 61, 114
 University of Chicago 芝加哥大学 12

University of Colorado 科罗拉多大学 118, 119
 University of Durham 德哈姆大学 114
 University of Michigan 密歇根大学 79
 University of New Mexico 新墨西哥大学 107
 University of Rome 罗马大学 124
 University of Texas 得克萨斯大学 79
 unseen dimensions 看不见的维数 38
 uranium nucleus 铀核 44
 Uranus 天王星 35
 Ursa Major 大熊座 8
 USA 美国 108

V

van der Marel, Roeland P. 74
 Very Large Array 甚大阵 77, 98, 99, 102
 Very Large Baseline Array (VLBA) 甚大基线阵 28, 98, 99, 106, 107, 109
 Very Large Telescope 甚大望远镜 10, 15, 31~32
 Very Long Baseline Interferometry (VLBI), 甚长基线干涉测量 28, 97, 108, 116, 117, 119
 Virgin Islands 维尔京群岛 28, 98
 Virgo 室女座 3
 Virgo A 室女座A 105, 106
 Virgo cluster 室女星系团 104~106
 visible universe 可观测宇宙 12, 123~124
 VLA 甚大阵 参见 *Very Large Array*
 voltage 电压, 电势 61
 Vulpecula 狐狸座 19

W

- W particles W 粒子 127
 Wald, Robert 131 (注释中)
 Walt Disney 沃尔特·迪士尼 14
 Washington University 华盛顿大学 84
 wavelengths 波长 132
 weak force 弱 (作用) 力 130
 Weinberg, Steven 斯蒂文·温伯格 117
 whirlpools 旋涡 18, 57
 white dwarfs 白矮星 129
 Wide Field and Planetary Camera 宽视场行
 星照相机 9
 Wilms, Joern 58 (注释中)
 Wilson, Robert 罗伯特·威尔逊 67
 wireless communication 无线电通讯 94
 wireless radio 无线电 92

X

- X-rays X 射线 6~7, 13, 58, 113,

118, 119

- background 背景 114~115
 mirrors 成像镜面 59
 sources 源 113
 telescopes 望远镜 119
 XMM-Newton XMM-牛顿卫星 58~59, 61

Y

- YEPUN telescope YEPUN 望远镜 31~32

Z

- Z particles Z 粒子 127
 Zel'dovich, Yakov B. 8, 73
 Zensus, Anton, 103
 zero spin 零自旋 48
 zero time 零时间 120
 Zzas, Andreas 安德烈斯·泽扎斯 90
 Znajek, Roman 罗曼·兹那耶克 60

鄧平船

PDG

无

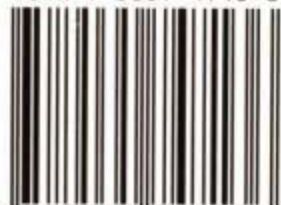
第一推动丛书
The Edge Of Infinity
限远的边缘

过去黑洞被认为是自然界最具破坏性的力量。现在，随着一系列逐步深入的惊人发现，特大质量黑洞在天体一览表中的位置经历了重大变迁。天文学正在揭示这类天体在宇宙早期结构的形成中所起的重要作用：催生了恒星的爆发性形成、行星甚至生命。它们可能贡献了大爆炸之后产生的多达全部辐射的一半，并有2亿个隐藏在可观测宇宙的广阔视野之内。这些对时空结构的巨大扰动在我们的起源和终极命运上有什么意义，弗尔维奥·梅利亚用优美的文笔和直白的方式传达了上述问题令人神往的答案。

弗尔维奥·梅利亚是美国亚利桑那大学的天文学教授和物理学副首席。他曾多次赴欧洲和澳大利亚的大学作学术访问，包括在巴黎、海德堡、帕多亚和墨尔本的岗位。他获得了多个国内和国际学术和教学的专门奖项，他的研究专长是黑洞和其他致密恒星的特点和性质，并已在主要学术刊物上发表论文180余篇。

责任编辑/吴伟 戴涛 装帧设计/吴新霞

ISBN 7-5357-4713-2



9 787535 747136 >

N·148 定价：36.00 元

建议上架：科普